

工學碩士 學位論文

沿岸域에서 暴風海溢과 高波浪의 結合에 의한
浸水解析手法의 開發

Development of Inundation Analysis Technique by
Combination of Storm Surge and Severe Water Waves
in the Coastal Zone

指導教授 金 度 三

2006年 8月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

金 智 敏

Development of Inundation Analysis Technique by Combination of Storm Surge and Severe Water Waves in the Coastal Zone

by
Ji Min Kim

**Department of Civil & Environment System Engineering
Graduate School
Korea Maritime University**

ABSTRACT

Recently, coastal disasters occur frequently by the typhoon and storm surge which accompany the severe water waves due to the global warming and the oceanic environment change. Coastal zone in the southern sea of Korea, which is located on the course of the typhoon, has been experienced a vast coastal disasters due to the typhoon almost every year. These damages are greatly dependent on the local peculiarities of the region which storm surge occurs. The scale and intensity of the typhoon are becoming large, and its occurrence frequency will increase in the future. Also, the scale of disaster due to these typhoons will increase too. Especially, in the case of storm surge, if the maximum storm surge height which is increased by combining with high tide overflow the coastal structure, it could result in many

loss of life and badly property damage in the inland. In order to prevent and reduce recurrence of the disaster due to the storm surge, it is very important to investigate the fluctuation characteristics of the storm surge height related to the local peculiarities at every coastal areas which occurrence of the disaster is expected. In this study, considering new deepwater design wave, the storm surge was simulated to examine its fluctuation characteristics at the coast of Busan. And typhoon of Sarah(5914), Thelma(8705) and Maemi(0314), which caused terrible damage to the coastal area in the coast of Busan in the past, were taken as an object of the storm surge simulations. In addition, new wind field, which calculated by MASCON model considering effect of topography, was estimated. Free atmospheric wind and sea wind were used as its initial conditions. Estimated new wind field data was applied to SWAN model. And, by using its results, characteristics of shallow wave were investigated. Results of shallow waves by consideration existing deepwater design wave and new deepwater design wave were compared about water depth 20m for the coast of Busan. Design water level considering storm surge, which was estimated by shallow wave, and shallow wave estimated by new deepwater design wave were applied to computation of overtopping rate. Also, calculation of overtopping rate was used VOF method. Using the overtopping rate estimated by these methods, technical skill of inundation analysis technique by combination of storm surge and severe water waves was developed. And, by application of these methods to actual place, validity of numerical analysis was confirmed.

沿岸域에서 暴風海溢과 高波浪의 結合에 의한 浸水解析手法의 開發

金 智 敏

韓國海洋大學校 大學院
土木環境工學科

요 약

최근, 지구온난화 및 변화된 해양환경의 영향으로 고파랑을 동반한 태풍 및 폭풍해일로 인하여 연안재해가 빈번히 발생되고 있다. 우리나라 남해안의 연안역은 태풍의 진로상에 위치되어 거의 매년 태풍으로 인한 막대한 연안재해를 입어왔다. 이러한 피해는 폭풍해일이 발생하는 지역의 지형적 특성에 따라 크게 영향을 받는다. 태풍의 규모와 강도가 커지고 있고, 향후 발생빈도가 더욱 증가할 것으로 예측된다. 또한, 재해규모도 증대될 것으로 예상되고 있다. 특히, 폭풍해일의 경우에 최대폭풍해일고가 만조와 중첩되면서 해안구조물을 월류하여 제내지에서 많은 인명손실과 막대한 재산피해를 준다. 폭풍해일에 의한 재해를 방지 또는 최소화하기 위해서 재해발생이 예상되는 모든 연안지역에 대해 지역적 특성과 관련된 폭풍해일고의 변동 양상을 조사하는 것이 중요하다.

본 연구에서는, 신심해설계파를 고려하여 부산 연안역에서의 폭풍해일고의 변동 특성을 검토하기 위해 수치시물레이션을 실시하였다. 과거 부

산 연안역에 심각한 피해를 발생시킨 태풍 Sarah(5914), Thelma(8705) 및 Maemi(0314)에 대해서 폭풍해일고의 검토를 위한 수치시뮬레이션을 실시하였다. 그리고, 자유대기풍과 해상풍을 초기조건으로 MASCON모델에 의한 지형의 영향이 고려된 새로운 바람장을 추정하고, 그 결과를 SWAN 모델에 적용하여 천해파랑특성을 검토하였다. 그리고, 부산 전연안역에 대해서 수심 20m내외 위치에서의 기존의 심해설계파제원과 신심해설계파제원에 의한 천해설계파를 산정하여 비교하였다. 이를 기초로 하여 추정된 폭풍해일고를 고려한 설계조위와 신심해설계파로부터 산정된 천해파랑에 대해 VOF법으로 월파랑을 산정함으로써 고파랑과 폭풍해일의 결합에 의한 침수해석을 수행할 수 있는 수법을 개발하였다. 그리고, 이를 현지에 적용하여 그의 타당성을 확인할 수 있었다.

目 次

ABSTRACT	i
요약	iii
目次	v
LIST OF FIGURES	viii
LIST OF TABLES	xii
LIST OF SYMBOLS	xiii
제1장 서론	1
1.1 연구의 배경과 목적	1
1.2 연구의 구성	3
제2장 이론적 배경	4
2.1 폭풍해일모델	4
2.1.1 개요	4
2.1.2 기초방정식	4
2.2 MASCON모델	10
2.2.1 태풍시의 바람	10
2.2.2 기초방정식	11
2.3 SWAN모델	14
2.3.1 개요	14
2.3.2 기초방정식	14
2.3.3 바람에 의한 파랑으로의 에너지유입항 S_{in}	15
2.3.4 파랑에너지의 소산 S_{ds}	16
2.3.5 비선형 상호작용에 의한 에너지전달항 S_{nl}	17
2.4 VOF법	18
2.4.1 개요	18

2.4.2 기초방정식	19
2.4.3 이류방정식	20
2.4.4 무반사모델	21
(1) 무반사 조파시스템	21
(2) 에너지감쇠대	21
2.5 침수범람모델	23
2.5.1 개요	23
2.5.2 기초방정식	23
제3장 수치해석결과	26
3.1 폭풍해일	26
3.1.1 태풍경로 및 조건	26
3.1.2 대상영역	30
3.1.3 수치계산의 검증	36
(1) 기압	36
(2) 폭풍해일고	38
3.1.4 기압장과 바람장의 해석	40
(1) 태풍 Sarah의 기압장과 바람장	40
(2) 태풍 Thelma의 기압장과 바람장	40
(3) 태풍 Maemi의 기압장과 바람장	40
3.1.5 폭풍해일고	47
3.2 MASCON모델에 의한 바람장	53
3.2.1 대상영역 및 조건	53
3.2.2 타당성 검증	54
3.3 SWAN모델에 의한 천해파랑	57
3.3.1 대상영역 및 조건	57
3.3.2 수치해석결과	67
(1) 녹산국가산업단지	67
(2) 광안리 인근해역	71
(3) 삼익아파트 전면에서의 파고 및 주기산정	71
3.3.3 천해파랑의 비교	80

(1) 구심해설계파랑 조건에 의한 천해파랑	80
(2) 신심해설계파랑 조건에 의한 천해파랑	88
(3) 천해파고의 비교	92
(4) 수심 20m에 있어서 파고 및 주기산정	92
3.4 월파량산정 및 범람해석	99
3.4.1 월파량산정	99
3.4.2 범람예측	101
제4장 결 론	104
4.1 폭풍해일	104
4.2 MASCON모델	105
4.3 SWAN모델	105
4.4 월파량산정 및 범람해석	106
<참고문헌>	107

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Definition sketch of numerical wave channel	18
Fig. 2.2 Concept of flood flow head	25
Fig. 3.1 Route of typhoon Sarah	27
Fig. 3.2 Route of typhoon Thelma	27
Fig. 3.3 Route of typhoon Maemi	28
Fig. 3.4 Route of typhoons used in numerical simulation	28
Fig. 3.5 Area of storm surge simulation	31
Fig. 3.6 Spatial distribution of water depth	35
Fig. 3.7 Comparison of atmospheric pressure between measured and calculated results for typhoon Maemi	37
Fig. 3.8 Comparison of storm surge height between measured and calculated results for typhoon Maemi	39
Fig. 3.9 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Sarah	42
Fig. 3.10 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Thelma	44
Fig. 3.11 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Maemi	46

Fig. 3.12 Spatial distribution of storm surge height for typhoon Sarah	48
Fig. 3.13 Spatial distribution of storm surge height for typhoon Thelma ...	49
Fig. 3.14 Spatial distribution of storm surge height for typhoon Maemi ...	50
Fig. 3.15 Calculating position of storm surge height in Busan coast	51
Fig. 3.16 Simulation area for MASCON model	53
Fig. 3.17 Sea wind field calculated by Eq.(2.30) for typhoon Maemi	55
Fig. 3.18 Sea wind field calculated by MASCON model for typhoon Maemi	55
Fig. 3.19 Sea wind field calculated by Eq.(2.30) for typhoon Sarah	56
Fig. 3.20 Sea wind field calculated by MASCON model for typhoon Sarah	56
Fig. 3.21 Computation area of SWAN simulation	59
Fig. 3.22 Spatial distribution of water depth	66
Fig. 3.23 Comparision of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Maemi around Noksan (case 2)	68
Fig. 3.24 Comparision of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Maemi around Noksan (case 3)	69

Fig. 3.25 Comparison of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Maemi around Noksan (case 7)	70
Fig. 3.26 Comparison of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Sarah around Gwanganri (case 12)	72
Fig. 3.27 Comparison of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Sarah around Gwanganri (case 13)	73
Fig. 3.28 Comparison of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Sarah around Gwanganri (case 16)	74
Fig. 3.29 Comparison of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Sarah around Gwanganri (case 17)	75
Fig. 3.30 Comparison of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Sarah around Gwanganri (case 19)	76
Fig. 3.31 Spatial distribution of significant wave height around front seawall of Samik APT	78
Fig. 3.32 Spatial distribution of significant wave period around front seawall of Samik APT	79
Fig. 3.33 Computation area for SWAN simulation	82

Fig. 3.34 Spatial distribution of water depth	84
Fig. 3.35 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-1	85
Fig. 3.36 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-2	86
Fig. 3.37 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-3	87
Fig. 3.38 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-4	87
Fig. 3.39 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-1	88
Fig. 3.40 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-2	89
Fig. 3.41 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-3	90
Fig. 3.42 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-4	91
Fig. 3.43 Contour line of water depth 20m around Busan coast	94
Fig. 3.44 Maximum significant wave height, period and direction on contour line of water depth 20m around Busan coast	98
Fig. 3.45 Snapshot of overtopping	100
Fig. 3.46 Spatial distribution of inundation height (Unit : m)	102
Fig. 3.47 Inundation map around Gwanganri for typhoon Maemi	103

LIST OF TABLE

Table 3.1 Characteristics of typhoon Sarah	29
Table 3.2 Characteristics of typhoon Thelma	29
Table 3.3 Characteristics of typhoon Maemi	30
Table 3.4 Mesh sizes applied to each simulating area	31
Table 3.5 Maximum storm surge height in cases of typhoon Sarah, Thelma and Maemi	52
Table 3.6 Mesh sizes applied to each simulating area	58
Table 3.7 Water level for each simulating area	60
Table 3.8 Deepwater design wave for Busan coast	61
Table 3.9 Reflection coefficient	66
Table 3.10 Mesh sizes applied to each simulating area	81
Table 3.11 Water level for each simulating area	84
Table 3.12 Deepwater design wave for Busan coast	85
Table 3.13 Distribution of significant wave height and period around front seawall of Samik APT	99

LIST OF SYMBOLS

A	선형파의 성장
A_h	수평 와동점성계수
A_v	연직 와동점성계수
α	Gauss의 정도계수
BE	파의 지속적 성장
C	파속
C_1	풍속저감계수
C_{bottom}	해저마찰계수
C_D	항력계수
C_X	X 방향의 전파속도(군속도)
C_Y	Y 방향의 전파속도(군속도)
C_σ	σ 공간에서의 전파속도
C_θ	θ 공간에서의 전파속도
D	전수심 ($h+n$)
D_{tot}	쇄파에 의한 총에너지의 소산율
D_x	x 방향의 층류저항
D_z	z 방향의 층류저항
δ	제1변분
E	보정량
$E(\sigma, \theta)$	에너지 밀도 스펙트럼
E_{tot}	총파랑에너지
n	폭풍해일에 의한 수면변위

F	VOF함수
f	Coriolis 계수
g	중력가속도
Γ	파형경사 종속계수
\mathbb{Y}_v	유체의 공극률
\mathbb{Y}_x	x 방향의 면적공극률
\mathbb{Y}_z	z 방향의 면적공극률
H	수위
h_h	단락시의 수심
h_l	월류시의 수심
h	수심
k	파수
\tilde{k}	평균 파수
l	에너지감쇠대의 넓이
l_0	에너지감쇠대의 개시위치
λ	Lagrange의 미정계수
M	x 방향의 유량
M_0	월류 유량
N_1	분포함수의 차수
N	y 방향의 유량
$\mathcal{M}(\sigma, \Theta)$	action 밀도 스펙트럼
n_n	Manning의 조도계수
n_x	x 방향의 외향법선의 단위벡터
n_y	y 방향의 외향법선의 단위벡터
n_z	z 방향의 외향법선의 단위벡터

v_ε	분자동점성계수와 와동점성계수의 합
p	압력
Δp	기압심도
p_c	태풍의 중심기압
p_r	태풍의 중심으로부터 r 만큼 떨어진 점에서의 기압
p_0	수면에서의 기압
Φ	유속 등의 물리량
q^*	조파위치 $x = x_s$ 에서의 조파소스의 유량밀도
ρ_a	대기의 밀도
ρ_w	해수의 밀도
r	등압선의 곡률반경
r_0	태풍반경
S	파랑스펙트럼을 구성하는 성분파
S_{in}	바람에 의한 파랑으로의 에너지유입
S_{ds}	쇄파와 저면마찰 및 백파 등에 의한 에너지소산항
S_{nl}	비선형상호작용에 의한 스펙트럼 성분간의 에너지전달
σ	각주파수
σ_i	관측오차
$\bar{\sigma}$	평균 각주파수
t	시간
τ_{bx}	해저에서 x 방향으로 전단력
τ_{by}	해저에서 y 방향으로 전단력
τ_{sx}	해면에서 x 방향으로 전단력
τ_{sy}	해면에서 y 방향으로 전단력
Θ_x	무차원계수

Θ_z	무차원계수
$\mathcal{U}(x, t)$	조파소스의 유속
U	x 방향의 해저에서 해면까지 평균유속성분
U_1	해상풍의 풍속
U_2	태풍이동에 의한 풍속
U_{10}	해면상 10m에서의 풍속
U_*	마찰속도
U_{gy}	경도풍의 풍속
U_x	해면 10m에서 x 방향으로 풍속
U_y	해면 10m에서 y 방향으로 풍속
u	x 방향의 유속성분
u_m	x 방향의 조정풍속성분
u_m^0	x 방향의 초기풍속성분
V	y 방향의 해저에서 해면까지 평균유속성분
V_T	태풍의 진행속도
v	y 방향의 유속성분
v_m	y 방향의 조정풍속성분
v_m^0	y 방향의 초기풍속성분
v	동점성계수
w	z 방향의 유속성분
w_m	z 방향의 조정풍속성분
w_m^0	z 방향의 초기풍속성분
Δx	수평방향의 격자간격
z	지반고
Δz	연직방향의 격자간격

제1장 서론

1.1 연구의 배경과 목적

최근, 지구온난화 및 변화된 해양환경의 영향으로 고파랑을 동반한 태풍 및 폭풍해일로 인하여 연안재해가 빈번히 발생되고 있으며, 특히 지구온난화 등에 의한 해수온도의 상승으로 그의 강도가 증대되고 있다.

우리나라 남해안의 연안역은 태풍의 진로상에 위치되어 거의 매년 태풍으로 인한 막대한 연안재해를 입어왔으며, 1959년도의 14호 태풍 Sarah, 1987년도의 5호 태풍 Thelma 및 2003년도의 14호 태풍 Maemi는 연안역에 엄청난 물적 및 인적피해를 초래한 대표적인 태풍이다. 근래에 급격한 지구환경변화에 따른 이상기후로 인하여 태풍의 규모와 강도가 커지고 있고, 향후 발생빈도가 더욱 증가할 것으로 예측되며, 더불어 재해규모도 증대될 것으로 예상되고 있다.

태풍에 의한 피해는 일반적으로 강풍에 의한 구조물 등의 붕괴, 폭우와 더불어 발생하는 폭풍해일에 의한 해수면상승으로 인한 침수피해가 큰 요인이다. 여기서, 폭풍해일의 경우에 최대폭풍해일고가 만조와 중첩되면서 호안을 비롯한 해안구조물을 월류하여 해안가 저지대 등의 제내지에서 광범위한 범람을 야기시켜 침수로 인한 많은 인명손실과 막대한 재산피해를 줄 뿐만 아니라 사회적 문제를 야기시킬 수 있다.

이와 같이 연안역에서 연안재해의 주요한 인자인 폭풍해일의 위험성에 대한 인식이 비교적 높아지고 있고, 폭풍해일에 관한 연구도 최근 2003년도의 14호 태풍 Maemi에 의한 엄청난 재해를 입은 후로 다소간 수행되었다(강용균(2004), 김정옥 등(2004), 최병호(2004), 최병호 등(2004), 강윤구 등(2004), 강윤구(2005) 및 Kawai et al.(2005a, b)). 하지만, 이상의 연구에서는 과거의 태풍에 의한 폭풍해일고의 특성뿐만 아니라, 지역적인 분포특성도 충분히 검토되고 있지 않은 실정에 있다. 이와 같은 과거의 대형태풍을 포함한 폭풍해일고의 지역적인 분포특성은 지역내에서 연안방재계획의 수립 및 연안재해예보에 주요한 요소이므로 조속히 검토되어야 할 과제이다.

한편, 연안역의 개발과 보전사업의 계획 및 설계에 있어서 주요 외력조건은 일반적으로 태풍에 의한 고파랑과 이상조위에 의한 수위상승이다. 이 중에서 고파랑의 설계과는 태풍내습시에 파랑의 통계적 특성으로 산정된다. 국내에 건설되고 있는 해안·항만구조

물은 일반적으로 50년 빈도의 심해설계파를 대상으로 설계되며, 일반적으로 수심 10m 내외에 여러 형태로 건설되어 왔다. 해안·항만구조물의 설계에서 가장 중요한 외력인 파고는 주어진 심해설계파 조건을 이용하여 천해설계파로 산정되며, 이러한 천해설계파 산정은 일반적으로 수치시뮬레이션을 이용한다. 그리고, 최근에 태풍내습에 따른 대상해역에서 파랑장의 영향을 추정하여 연안사업의 적절한 평가를 수행하기 위한 방안의 일환으로, 빈번한 이상기후의 영향을 고려한 신심해설계파가 추정되었다(한국해양연구원, 2005).

따라서, 본 연구에서는 폭풍해일의 피해에 가장 많이 노출되어 있는 부산연안역을 대상으로 폭풍해일고의 검토를 위한 수치시뮬레이션을 실시하였다. 먼저 2003년 9월 12일 경남 사천에 상륙하여 경남 및 부산연안역에 막대한 피해를 입혔고, 과거 태풍중에 태풍규모와 재해규모의 양측면에서 각종 기록을 경신한 14호 태풍 Maemi를 대상으로 폭풍해일고를 산정하였다. 다음으로 과거의 기록에서 부산을 포함한 우리나라 남해안의 동부연안에 큰 피해를 발생시킨 1959년 14호 태풍 Sarah와 1987년 5호 태풍 Thelma 상륙시의 부산연안역의 폭풍해일고를 산정하였다.

그리고, 대상영역에 가장 높은 폭풍해일고가 산정된 2003년도 14호 태풍 Maemi 및 1959년 14호 태풍 Sarah에 대해 추정된 자유대기풍과 해상풍을 초기조건으로 MASCON 모델에 의한 지형의 영향이 고려된 새로운 바람장(해상풍)을 추정하고, 그 결과를 SWAN모델에 적용하여 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지 및 수영구 광안리 주변해역에서 천해파랑의 특성을 검토하였다. 그리고, 부산 전연안역에 대해서 수심 20m내외 위치에서의 기존의 심해설계파제원과 신심해설계파제원에 의한 천해설계파를 산정하여 비교하였다.

또한, 설계조위(약최고고조위+조위편차)와 신심해설계파를 고려하여 산정된 천해파랑에 대해 VOF법으로 월파랑을 산정함으로써 고파랑과 폭풍해일의 결합에 의한 제내지의 침수현상을 검토할 수 있는 수치해석수법을 기술하였다. 그리고, 이를 부산광역시 수영구 광안리 지역에 적용하여 대상지역 배후에 있는 아파트단지내의 범람을 예측하였으며 현지결과와 비교하여 그의 타당성을 확인하였다.

1.2 연구의 구성

본 연구는 총 4장으로 구성되며 다음과 같다.

제1장에서는 본 연구의 배경과 목적에 대해서 서술하고, 다음으로 본 연구의 구성에 대해 간단히 기술한다.

제2장에서는 수치해석을 위하여 본 연구에서 제안하는 모델의 기초방정식과 경계조건에 대한 이론을 전개하고, 수치해석을 수행함에 있어 필요한 전반적인 사항을 기술한다. 2.1절은 폭풍해일모델, 2.2절은 MASCON모델, 2.3절은 SWAN모델, 2.4절은 VOF법, 2.5절은 범람해석모델에 대해 각각 기술한다.

제3장에서는 본 연구에서 제안한 모델에 대한 수치해석을 수행하고 그 결과를 제시한다. 3.1절에서 폭풍해일모델의 타당성을 검증하고 대상지역의 폭풍해일고를 산정하며, 3.2절에서 MASCON모델의 타당성 검증과 모델에 의해 추정된 바람장을 제시한다. 3.3절에서 SWAN모델을 적용하여 산정된 천해설계파를 제시하며, 3.4절에서는 산정된 천해설계파를 이용하여 VOF법과 범람해석모델을 사용하여 대상지역의 범람해석을 수행한 결과를 나타낸다.

제4장에서는 이상으로부터 도출된 중요한 사항을 요약하여 본 연구의 결론으로 한다. 마지막으로 본 연구에 있어서 참고하고 인용한 주요한 문헌을 제시한다.

제2장 이론적 배경

2.1 폭풍해일모델

2.1.1 개 요

태양과 달의 인력에 의해 해수면이 규칙적으로 변동하는 성분을 천문조라고 하며, 천문조의 높은 피크를 만조(고조), 낮은 피크를 간조(저조)라고 한다. 만조와 간조의 차이인 조위차(조차)가 크게 되는 시기를 대조, 적게 되는 시기를 소조라고 하며, 모두 약 반개월의 주기로 나타난다. 달과 태양은 규칙적으로 운동하기 때문에 장기간에 걸쳐서 조위관측을 수행하면 과거 및 앞으로의 임의시각에 있어서 천문조위를 정확히 추정할 수 있다.

그러나, 태풍이나 저기압이 접근하여 기압이 저하되고 강풍이 불면 실제의 조위는 천문조보다 높아지게 된다. 또한, 해류의 유로가 변화하는 경우에도 수주에서 수개월에 걸쳐 조위가 변화하는 경우도 있다. 이와 같은 조위변화는 달이나 태양 등의 천체운동과는 직접적인 관계는 없고, 지구상의 여러 기상적인 요인에 의해 발생하기 때문에 기상조라고 불린다. 그리고, 이 기상조의 진폭(천문조로부터 높이)을 폭풍해일고 혹은 조위편차라고 부른다.

폭풍해일은 주로 태풍의 중심부근에서는 그 주변과 비교하여 기압이 낮고 해면을 누르는 힘이 약하기 때문에 해면이 높아지게 되는 저기압에 의한 수위상승(pressure setup)과 바람이 바다에서 육지로 향하여 불면 해면에 발생하는 마찰력에 의해 해수는 육지측으로 운반되고 이것이 축적되어 해면이 높아지게 되는 바람에 의한 수위상승(wind setup) 및 고파랑의 쇄파에 의한 수위상승(wave setup)의 3성분으로 구성된다.

2.1.2 기초방정식

본 연구의 폭풍해일고 추산에 적용되는 기초방정식은 다음의 연속방정식(2.1)과 운동방정식(2.2)~(2.4)로 구성된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{du}{dt} = fv - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.2)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2.3)$$

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.4)$$

여기서, x, y 는 수평방향으로, z 는 연직방향으로 각각 취한 좌표계이고, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 유속성분이다. 그리고, f 는 Coriolis계수, ρ_w 는 해수의 밀도, p 는 압력, A_h 와 A_v 는 수평 및 연직와동점성계수, g 는 중력가속도이다. η 는 폭풍해일에 의한 수면변위이다.

식(2.1)을 해저 $z = -h$ 에서 해면 $z = \eta$ 까지 적분하면 다음의 식(2.5)를 얻는다.

$$\int_{-h}^{\eta} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz = - (w_{z=\eta} - w_{z=-h}) \quad (2.5)$$

여기서, h 는 수심이다.

또한, U, V 를 해저에서 해면까지의 평균유속으로 한다면 다음의 식을 정의할 수 있다.

$$(h + \eta) U = \int_{-h}^{\eta} u dz \quad (2.6)$$

$$(h + \eta) V = \int_{-h}^{\eta} v dz \quad (2.7)$$

식(2.1)의 우변에 Leibnitz적분공식을 적용하면 다음의 결과식(2.8)과 (2.9)를 얻는다.

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz - u \frac{\partial \eta}{\partial x} - u \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.8)$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial v}{\partial y} dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz - v \frac{\partial \eta}{\partial y} - v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.9)$$

식(2.5)의 우변에 있는 연직방향의 유속 $w_{z=\eta}$ 와 $w_{z=-h}$ 는 각각 해면와 해저에서 수면경계조건 및 불투과경계조건으로부터 다음과 같이 된다.

$$w_{z=\eta} = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (2.10)$$

$$w_{z=-h} = -\frac{dh}{dt} = -u \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2.12)$$

식(2.6)~(2.12)를 사용하면 식(2.5)는 z 방향으로 적분된 연속식(2.13)으로 귀착된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \{ (h+\eta) U \}}{\partial x} + \frac{\partial \{ (h+\eta) V \}}{\partial y} = 0 \quad (2.13)$$

유속 u, v 를 해저 $z=-h$ 에서 해면 $z=\eta$ 까지 적분하여 그 유량을 M, N 으로 하면 다음의 식을 나타낼 수 있다.

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = u(h+\eta) = uD \quad (2.14)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = v(h + \eta) = vD \quad (2.15)$$

D 는 기본수심 h 와 폭풍해일에 의한 수면변위 η 를 합한 전수심이다.

식(2.13)에 유량 M , N 에 관한 식(2.14)와 (2.15)를 적용하면 다음의 연속식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.16)$$

식(2.4)를 z 방향에 대해서 적분하면 다음 식(2.17)이 얻어진다.

$$p = p_w g(\eta - z) + p_0 \quad (2.17)$$

여기서, p_0 는 수면에서의 기압이다.

식(2.17)을 식(2.2) 및 (2.3)에 대입하여 해저 $z = -h$ 에서 해면 $z = \eta$ 까지 적분하면 다음과 같은 운동방정식(2.18)과 (2.19)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \quad (2.18)$$

$$= fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} + A \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \quad (2.19)$$

$$= -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} + A \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right)$$

식(2.18)과 (2.19)에서 연직와동점성계수를 포함하는 항에 전단응력을 적용하면 다음의 관계를 나타낼 수 있다.

$$A \int_{-h}^n \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz = A \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=n} - \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=-h} \right\} = \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2.20)$$

$$A \int_{-h}^n \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} dz = A \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=n} - \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=-h} \right\} = \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} \quad (2.21)$$

여기서, τ_{sx} 와 τ_{sy} 및 τ_{bx} 와 τ_{by} 는 해면 및 해저에서 x , y 방향으로 각각의 전단력이며, 다음의 식(2.22)와 (2.23) 및 식(2.24)와 (2.25)로 나타내어진다.

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D U_x \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (2.22)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_D U_y \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (2.23)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n_n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.24)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n_n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.25)$$

여기서, ρ_a 는 대기의 밀도, U_x 와 U_y 는 해면상 10m에서 각각 x , y 방향으로 풍속, n_n 은 Manning의 조도계수, C_D 는 해면저항계수(항력계수)이다.

항력계수에 대해서는 모형실험이나 현지관측에 기초한 많은 경험값이 제안되어 있지만, 본 연구에서는 다음의 Mitsuyasu and Kusaba(1984)에 의한 제안식을 사용하였다.

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024 U_{10})/10^{-3} & (U_{10} < 8 m/s) \\ (0.581 + 0.063 U_{10})/10^{-3} & (U_{10} \geq 8 m/s) \end{cases} \quad (2.26)$$

여기서, U_{10} 은 해면상 10m에서 풍속이다.

이상과 같은 폭풍해일고의 추정이론으로부터 수치시뮬레이션을 실시하기 위해서는 연속식(2.16)과 비선형장파방정식(2.18) 및 (2.19)를 동시에 수치적으로 풀어야 하며, 이에 수치기법으로 유한차분법을 적용하였다.

2.2 MASCON모델

2.2.1 태풍시의 바람

태풍의 중심부는 주변에 비해 기압이 낮기 때문에 그 기압차를 메우기 위하여 바람이 불게 되며, 지구가 자전하고 있기 때문에 북반구에서는 오른쪽 방향으로 힘(Coriolis력)이 작용한다. 이로 인하여 태풍의 중심주변으로 반시계방향으로 부는 경도풍이 발생한다. 해면에 있어서 마찰의 영향을 받지 않는 상공에서 경도풍의 풍속 U_{gr} 은 기압경도력, 원심력 및 Coriolis력의 평형으로부터 다음의 식과 같이 주어질 수 있다.

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p_r}{\partial r} = \frac{U_{gr}^2}{r} + fU_{gr} \quad (2.27)$$

여기서, r 은 등압선의 곡률반경이다.

Myers and Malkin(1961)의 분포식(2.28)에 의한 기압분포를 가정한 다음 식(2.27)을 풀면 다음의 식(2.29)가 얻어진다.

$$p_r = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (2.28)$$

$$U_{gr} = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \quad (2.29)$$

여기서, Δp 는 기압심도, p_c 는 태풍의 중심기압, p_r 은 태풍의 중심으로부터 r 만큼 떨어진 점에서의 기압, r_0 는 태풍반경이다.

해상풍의 풍속 U_1 은 다음 식(2.30)로 표현될 수 있다.

$$U_1 = C_1 U_{gr} \quad (2.30)$$

여기서, C_1 은 계수이며 바람의 관측치와 비교로부터 산정되지 않고 폭풍해일의 추산치가 관측치와 일치하도록 산정되는 경험치로 0.6~0.7정도(紫木, 2004)의 값을 가지며, 본 연구에서는 0.67을 적용하였다. 또한, 풍속의 편향은 30° (紫木, 2004)로 설정되었다. 그리고, 태풍의 이동에 의해 발생하는 풍속 U_2 는 다음 식(2.31)로 표현된다.

$$U_2 = \frac{U_{gr}(r)}{U_{gr}(r_0)} V_T \quad (2.31)$$

여기서, V_T 는 태풍의 진행속도이며, U_2 의 방향은 태풍의 진행속도와 동일하다.

2.2.2 기초방정식

MASCON모델의 기초방정식은 비압축성의 대기에 대해 질량보존식을 나타내는 다음의 연속식으로 주어진다.

$$\frac{\partial u_m}{\partial x} + \frac{\partial v_m}{\partial y} + \frac{\partial w_m}{\partial z} = 0 \quad (2.32)$$

여기서, u_m, v_m, w_m 은 x, y, z 방향의 풍속성분이다.

MASCON모델은 태풍모델에 의해 얻어진 바람장 (u_m^0, v_m^0, w_m^0)을 초기치로 하여 다음에 주어지는 변분방정식(2.33)의 보정량 $E(u_m, v_m, w_m, \lambda)$ 가 최소가 되도록 풍속 (u_m, v_m, w_m)을 산정한다.

$$E(u_m, v_m, w_m, \lambda) = \int_V [\alpha_1^2 \{ (u_m - u_m^0)^2 + (v_m - v_m^0)^2 \} + \alpha_2^2 (w_m - w_m^0)^2]$$

$$+ \lambda \left(\frac{\partial u_m}{\partial x} + \frac{\partial v_m}{\partial y} + \frac{\partial w_m}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (2.33)$$

여기서, u_m, v_m, w_m 는 질량보존식을 만족하도록 조정된 풍속성분, u_m^0, v_m^0, w_m^0 는 초기풍속성분, λ 는 Lagrange의 미정계수, $\alpha_i (i=1,2)$ 는 Gauss의 정도계수로 다음의 식으로부터 산정된다.

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \sigma_i^{-2} \quad (2.34)$$

여기서, σ_i 는 관측오차이며, 이는 풍속성분에서 관측된 풍속성분의 기울기를 나타낸다. α_1 과 α_2 의 비 (α_1/α_2)는 조정된 풍속의 수평성분과 연직성분의 상대적인 크기를 결정하는 계수이다.

식(2.32)의 최소해를 가지는 Euler-Lagrange의 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u_m = u_m^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \quad (2.35)$$

$$v_m = v_m^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \quad (2.36)$$

$$w_m = w_m^0 + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial u_m}{\partial x} + \frac{\partial v_m}{\partial y} + \frac{\partial w_m}{\partial z} = 0 \quad (2.38)$$

또한, 이 방정식들은 다음의 경계조건을 만족하여야 한다.

$$x\text{방향의 경계 : } n_x \lambda \delta(u_m) = 0 \quad (2.39)$$

$$y\text{방향의 경계 : } n_y \lambda \delta(v_m) = 0 \quad (2.40)$$

$$z\text{방향의 경계 : } n_z \lambda \delta(w_m) = 0 \quad (2.41)$$

여기서, $\delta(\cdot)$ 는 괄호내 변수의 제1변분, n_x, n_y, n_z 는 각각 외향법선의 단위벡터이다. 식(2.35)~(2.37)을 각각의 방향으로 미분하고, 변분방정식(2.33)에 대입하면 다음과 같은 Poisson형의 미분방정식이 얻어진다.

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = -2a_1^2 \left(\frac{\partial u_m^0}{\partial x} + \frac{\partial v_m^0}{\partial y} + \frac{\partial w_m^0}{\partial z} \right) \quad (2.42)$$

위의 식으로부터 λ 를 구하여 식(2.35)~(2.38)에 대입하면 질량보존식을 만족하도록 조정된 u_m, v_m, w_m 가 얻어진다. 동시에, 저면 및 측면의 경계조건으로서 다음의 식이 주어진다.

$$\frac{\partial \lambda}{\partial n} = 0 \quad (2.43)$$

2.3 SWAN모델

2.3.1 개 요

SWAN(Simulation WAVE Nearshore)에서 고려할 수 있는 전파과정은 지리적 공간좌표 상에서의 이류, 수심과 흐름의 공간변화에 의한 굴절, 수심과 흐름의 공간변화에 의한 천수, 역류에 의한 파랑의 반사 및 차단, 구조물(장애물)에 의한 파랑의 반사, 차단 및 전달, Phase-decoupled approach를 이용한 회절, 파랑에 의한 평균수위변동(wave-induced set-up)이 있다. 그리고, 바람에 의한 파랑에너지의 생성, 백파(whitcapping), 쇄파(depth-induced wave breaking), 저면마찰(bottom friction)에 의한 파랑에너지의 소산, 비선형상호작용에 의한 파랑간의 에너지전달 등의 파랑에너지의 생성, 소산 등을 고려할 수 있다.

2.3.2 기초방정식

SWAN모형에서 파랑은 쇄파대에서와 같이 비선형성이 큰 조건에서도 파랑의 스펙트럼 분포를 고정도로 예측할 수 있는 2차원 wave action density spectrum으로 표현된다. SWAN에서 고려되는 action density spectrum $\mathcal{N}(\sigma, \Theta)$ (σ 와 Θ 는 각각 상대주파수와 파향)은, 흐름이 존재할 때 파동(action density)은 보존되는 반면에 에너지(energy density)는 보존되지 않기 때문에, energy density spectrum $\mathcal{E}(\sigma, \Theta)$ 보다 일반화 된 물리량이다. $\mathcal{N}(\sigma, \Theta)$ 는 $\mathcal{E}(\sigma, \Theta)$ 를 상대주파수 σ 로 나눈 값과 동일하다.

SWAN에서 파랑스펙트럼에 관한 기초방정식은 다음과 같이 주어진다(Hasselmann et al., 1973).

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathcal{N} + \frac{\partial}{\partial X} C_X \mathcal{N} + \frac{\partial}{\partial Y} C_Y \mathcal{N} + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma \mathcal{N} + \frac{\partial}{\partial \Theta} C_\Theta \mathcal{N} = \frac{S}{\sigma} \quad (2.44)$$

여기서, 좌변의 첫 번째 항은 파동의 국소적인 시간변화를 나타내며, 두 번째와 세 번째 항은 파동의 이류항을 나타낸다. 네 번째 항은 수심과 흐름의 변화에 의해 발생하는

상대주파수의 변화를 나타내고, 다섯 번째 항은 수심과 흐름으로 인한 굴절에 의한 변화를 나타낸다. 그리고, C_X, C_Y 는 각각 X, Y 방향의 전파속도(군속도)를, C_σ 와 C_θ 는 σ 와 θ 공간에서의 전파속도를 각각 나타낸다. 우변의 항 $S=(S(\sigma, \theta))$ 는 파랑스펙트럼을 구성하는 성분파로의 에너지 입·출력을 표현한 것으로, 파랑의 생성, 소산 및 성분파간의 비선형 상호작용에 의한 에너지전달을 포함한다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2.45)$$

여기서, S_{in} 은 바람에 의한 파랑으로의 에너지유입을 나타내며, S_{ds} 는 쇄파와 저면마찰 및 백파 등에 의한 에너지소산항을, S_{nl} 은 비선형상호작용에 의한 스펙트럼 성분간의 에너지전달을 나타내고 있다.

2.3.3 바람에 의한 파랑으로의 에너지유입항 S_{in}

수면상에 바람이 불면 수면파가 발생하며, 이것이 시·공간적으로 발달한다. 이와 같은 풍파의 발생·발달과정은 바람과 수면파의 상호작용에 의한 결과, 바람으로부터 파랑으로 에너지가 이송되기 때문에 발생된다. 이것을 표현한 것이 바람에 의한 파랑으로 에너지유입항이며, 바람으로부터 파랑으로의 에너지전송은 Phillips(1957)의 공명기구(resonance mechanism)와 Miles(1957)의 불안정기구(feed-back)로 설명되며, 대응하는 source 항은 통상 선형과 지수함수적인 증가의 합으로 기술된다. SWAN에서는 일반적으로 다음의 식을 나타낸다.

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (2.46)$$

여기서, A 는 선형파의 성장을, BE 는 파의 지속적 성장을 의미한다. A 와 B 는 주파수와 파향, 풍속과 풍향에 의존한다. 모델에서 사용되는 풍속은 U_{10} (해면상 10m에서의 풍속)이며 계산에 사용되는 마찰속도 U_* 는 다음과 같다.

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (2.47)$$

여기서, C_D 는 다음의 식으로 표현되는 Wu (1982)의 저항계수이다.

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.065 \text{ m/s} \times U_{10}) \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2.48)$$

2.3.4 파랑에너지의 소산 S_{ds}

파랑에너지의 소산항은 세 가지의 다른 요인, 백파(whitecapping, $S_{ds, w}(\sigma, \Theta)$), 해저마찰(bottom friction, $S_{ds, b}(\sigma, \Theta)$)과 쇄파(depth-induced breaking, $S_{ds, br}(\sigma, \Theta)$)의 합으로 나타내어진다.

SWAN을 포함하는 현재의 제3세대 파랑추산모델에 있어서, 백파의 수식화는 다음과 같은 pulse-based model(Hasselmann, 1974)에 기초한다.

$$S_{ds, w}(\sigma, \Theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{k} E(\sigma, \Theta) \quad (2.49)$$

여기서, Γ 는 파형경사 종속계수, k 는 파수, $\tilde{\sigma}$ 와 \tilde{k} 는 각각 평균 각주파수와 평균 파수를 나타낸다. Komen et al.(1984)은 충분히 발달된 조건에서 파의 에너지평형을 완료시키는 것으로 Γ 의 값을 산정하고 있다.

Depth-induced dissipation은 해저마찰, 저면운동(bottom motion), 침투(percolation) 또는 바닥의 불규칙성으로 인한 back-scattering에 의해 발생한다. 대륙붕에서 소산의 지배적인 메카니즘은 해저마찰로 발생하며 일반적으로 다음과 같이 제시된다.

$$S_{ds, b}(\sigma, \Theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \Theta) \quad (2.50)$$

여기서, C_{bottom} 은 해저마찰계수를 나타낸다. Hasselmann et al.(JONSWAP, 1973)은 경험상 수의 이용을 제안하였다. 해저마찰에 의한 파랑에너지의 소산에 미치는 평균류의 영향은 저면 조도길이 스케일의 정확한 산정이 평균류의 효과보다 에너지소산율에 더욱 큰 영향을 주지 않기 때문에 고려되지 않는다.

파랑장에서 수심에 의해 발생하는 쇄파에 의한 파랑에너지소산의 계산에는 단파(bore)의 소산이 적용된다(Battjes and Janssen, 1978). Eldeberky and Battjes(1995)는 스펙트럼형이 보존되는 Battjes and Janssen (1978)의 bore모델에 의한 스펙트럼을 체계화하였다. SWAN은 방향성을 고려하여 다음과 같이 사용하였다.

$$S_{ds, br}(\sigma, \Theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \Theta) \quad (2.51)$$

여기서, E_{tot} 는 총파랑에너지를, $D_{tot} < 0$ 은 Battjes and Janssen (1978)에 따른 쇄파에 의한 총에너지의 소산율을 나타낸다. D_{tot} 의 값은 쇄파지표(breaking parameter)인 $Y = H_{max} / H_{max}$ 는 수심 H 에서 존재할 수 있는 최대파고)를 따른다. SWAN에서는 상수값과 변수값이 이용되는데, 상수값은 $Y = 0.73$ (Battjes and Stive, 1985)이다.

2.3.5 비선형 상호작용에 의한 에너지전달항 S_{nl}

심해에서는 quadruplet wave-wave interactions이 스펙트럼의 발달에 지배적이다. 이 현상으로 파랑에너지는 스펙트럼피크에서 저주파수와 고주파수영역으로 전달된다. 극천해역에서는 triad wave-wave interactions에 의해 에너지가 저주파수영역에서 종종 고주파수영역으로 전달되며, 따라서 고차의 조화성분으로 된다. quadruplet wave-wave interactions을 완전히 계산하기에는 상당한 시간이 소요되며, FD-RIAM이라 불리는 기법으로 수행된다. 계산속도를 향상시키기 위해 파라미터법(parametric method)을 비롯한 많은 기법이 제안되어 있으며, Discrete Interaction Approximation(DIA)으로 실행된다. DIA근사는 발달 과정에 있는 파랑스펙트럼의 본질적인 특징을 상당히 잘 나타내고 있다는 것이 밝혀져 있다. 경우에 따라 DIA기법은 충분한 정확도를 나타내지 않을 수도 있다. DIA의 정도는 quadruplet configurations의 수가 증가함에 따라 향상될 수 있다.

2.4 VOF법

2.4.1 개요

최근, 자유수면을 갖는 비압축성 유체의 해석을 위해 Hirt and Nichols(1981)가 제안한 VOF법이 자유수면을 취급하는 많은 학문분야에서 활발히 활용되고 있다. 특히, 일본에서는 잠제에 의한 쇄파해석에 岩田 등(1994)이 처음으로 VOF법을 적용하였고, 유럽에서는 Petit et al.(1994), Van Gent et al.(1994) 등에 의해 VOF법의 유효성이 보고되고 있으며, 그 이후, 許東秀(2000)는 3차원 구조물에 대한 파력해석에까지 VOF법을 확장시켰다. 또한, 많은 일본 연구자에 의한 공동연구의 결과로 개발된 CADMAS-SURF(沿岸開發技術研究Center, 2001)는 사용자가 직접 입·출력을 제어할 수 있는 효과적인 2차원 파동장의 해석프로그램으로 알려져 있다. 국내에서는 김도삼 등(2001, 2002)이 최초로 VOF-SOLA법을 이용한 수치파동수로를 제안하고 잠제주변의 파동장해석을 수행하였다.

CADMAS-SURF에서 적용하고 있는 Fig. 2.1의 수치파동수로는 2차원 수치파동수로내에 파의 재반사를 방지하지 위한 개경계처리기법으로 해석영역 양쪽에 에너지감쇠영역을 두고 있고, 조파를 위해 조파소스를 적용하고 있다.

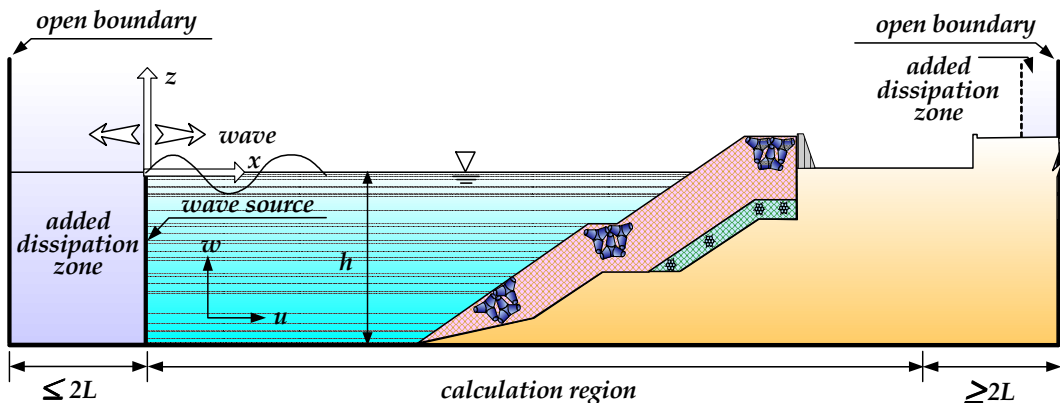


Fig. 2.1 Definition sketch of numerical wave channel.

2.4.2 기초방정식

유체를 2차원 비압축성의 점성유체로 가정하면 기초방정식은 연속방정식(2.52)와 porous로 확장한 Navier-Stokes의 운동방정식(2.53), (2.54)로 구성된다.

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (2.52)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = & - \frac{\gamma_v}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \end{aligned} \quad (2.53)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = & - \frac{\gamma_v}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_v g \end{aligned} \quad (2.54)$$

여기서, v_e 는 분자동점성계수와 와동점성계수의 합, γ_v 는 유체의 공극률, γ_x, γ_z 는 각각 x, z 방향의 면적공극률을 나타낸다. 또한, $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ 는 관성력계수 C_M 을 사용하면 식(2.55)~(2.57)과 같이 주어진다.

$$\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \quad (2.55)$$

$$\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \quad (2.56)$$

$$\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \quad (2.57)$$

그리고, D_x, D_z 는 후술하는 식(2.66), (2.67)에 나타내는 계수이며, S_p, S_u, S_w 는 조파소스항으로 다음의 식과 같이 정의된다.

$$S_p = q(z, t) \quad (2.58)$$

$$S_u = uq(z, t) \quad (2.59)$$

$$S_w = wq(z, t) + \frac{v}{3} \frac{\partial q(z, t)}{\partial z} \quad (2.60)$$

여기서, $q(z, t)$ 는 $x = x_s$ 의 위치에서 격자간격을 Δx_s 로 두면 다음의 식(2.61)과 같이 주어진다.

$$q(z, t) = 2 \frac{U(x, t)}{\Delta x_s} \quad (2.61)$$

여기서, $U(x, t)$ 는 조파소스의 유속이다. 또한, 항력항 R_x , R_z 를 항력계수 C_D 를 적용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.62)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.63)$$

여기서, Δx , Δz 는 수평, 연직방향의 격자간격이다.

2.4.3 이류방정식

VOF함수 F 는 일정 물리량인 유체의 체적율로서 $0 \leq F \leq 1$ 의 범위를 가진다. 여기서, $F = 1$ 일 경우는 유체셀로, $F = 0$ 일 경우는 기체셀로, $0 < F < 1$ 일 경우는 표면셀로 각각 판단하여 자유수면을 추적하게 되며, 다음의 이류방정식(2.64)에 의해 VOF함수가 이

류된다.

$$\nabla_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \nabla_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \nabla_z w F}{\partial z} = S_F \quad (2.64)$$

여기서, $S_F = Fq(z, t)$ 는 조파소스를 위한 소스항이다.

2.4.4 무반사모델

(1) 무반사 조파시스템

정상상태의 파동장을 얻기 위해서는 장시간의 해석이 필요하게 되며, 이 때 해석영역의 양단으로부터 반사파를 제거하기 위하여 무반사모델이 적용되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 다음에 기술하는 Sommerfeld의 방사경계조건과 에너지감쇠대를 조합한 무반사조건식(2.65)를 적용한다.

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + C \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 \quad (2.65)$$

여기서, Φ 는 유속 등의 물리량, C 는 파속이다.

(2) 에너지감쇠대

에너지감쇠대는 식(2.53)과 식(2.54)의 운동방정식에 이하의 식(2.66) 및 식(2.67)의 유속에 비례하는 감쇠항을 부가한다.

$$x\text{방향유속의 감쇠항} = -D_x u$$

$$D_x = \Theta_x \sqrt{\frac{g}{h}} (N_1 + 1) \left(\frac{x - x_0}{l} \right)^N \quad (2.66)$$

z방향유속의 감쇠항 $= -D_z w$

$$D_z = \theta_z \sqrt{\frac{g}{h}} (N_1 + 1) \left(\frac{x - x_0}{l} \right)^{N_1} \quad (2.67)$$

여기서, h 과 l_0 는 에너지감쇠대의 넓이와 개시위치, N_1 은 분포함수의 차수, θ_x 와 θ_z 는 무차원계수이다.

2.5 침수범람모델

2.5.1 개요

범람류 해석을 위해 McDonald and Ledger(1981)는 대상영역이 산지나 제방 등으로 둘러싸인 폐쇄적인 지형인 경우에 수위와 유량의 관계로부터 연속방정식만을 적용하여 범람역을 구하는 방법을 제안하였다. 하지만, 이 방법은 적용 가능한 영역이 제한적이고 얻을 수 있는 결과도 매우 부족한 단점이 있다. 범람해석을 행하는 대부분의 영역이 평면적이므로 2차원 홍수범람류해석이 요구되고 있다. Xanthopoulos, Th. and Ch. Koutitas(1976)은 범람류의 거동에 천수방정식을 적용하여 유한차분법으로 해석하였으며, Miura and Shimizu(1993)은 건물이나 도로가 복잡하게 배치되어 있는 도시역에 적용하여 범람류를 계산하였다. 武田(1996)은 임해해역에서의 고조범람해석을 수치해석을 통해 해석하였으며, 도심부의 건물 등과 같은 구조물이 존재하는 경우에 계산격자내 건물이 차지하는 점유율의 개념을 도입하여 수치계산을 수행하였다. 또한, Takeda et al.(2005)은 유한체적법의 개념을 도입한 비구조격자를 이용하여 폭풍해일 등에 의한 연안역에서의 범람을 도로를 통한 홍수전파의 특성으로 재현하여 해석하였다. 본 연구에서는 직각좌표계 장방형격자 범람해석법을 사용하여 연안역에서의 폭풍해일에 의한 홍수범람류의 전파특성을 유한차분법으로 해석한다.

2.5.2 기초방정식

평면2차원 범람모델의 기초방정식은 연속방정식(2.68)과 운동방정식(2.69), (2.70)으로 구성된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.68)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2.69)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (2.70)$$

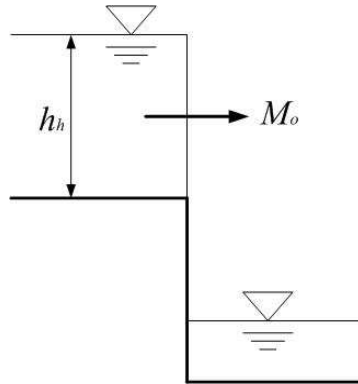
여기서, $M=uh$, $N=vh$ 이며, H 는 수위 ($H=h+z$, z 는 지반고)이다.

그리고, 범람을 해석하는 경우 수위가 0인 상태의 격자에 범람수가 전파하는 범람수 선단부의 취급이 문제가 된다. 본 연구에서는 선단부를 포함하여 범람수가 불연속이 되는 경우에 Fig. 2.2에 나타난 지반고와 수위의 관계에 따라 단락식이나 월류식을 각각 적용하였다. 즉, 인접한 지역에 비해 지반고가 높은 경우(Fig. 2.2(a))에 식(2.71)의 단락식을, 인접한 지역에 비해 지반고가 낮은 경우(Fig. 2.2(b))에 대해서는 식(2.72)의 월류식을 각각 적용하여 유량을 산정한다.

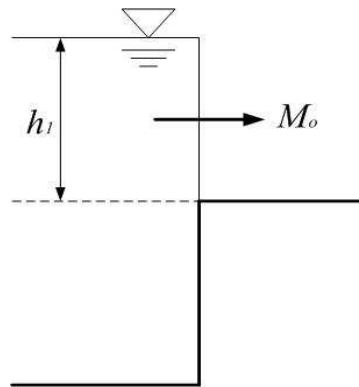
$$M_o = \mu h_h \sqrt{gh_h} \quad (2.71)$$

$$M_o = \mu' h_l \sqrt{2gh_l} \quad (2.72)$$

여기서, M_o 는 월류유량, $\mu = (2/3)^{3/2} = 0.544$, $\mu' = 0.35$ 이며, h_h 는 단락시의 수심, h_l 은 월류시의 수심을 나타낸다.



(a) Case of down-stream



(b) Case of up-stream

Fig. 2.2 Concept of flood flow head.

침수역(침수되는 영역)과 지반역(침수되지 않는 영역)의 경계는 수심의 최소치 $\varepsilon = 0.001m$ 에 의해 결정되는 것으로 하였으며, 이 때 ε 이하의 지역에 대해서는 지반역, ε 이상의 지역에 대해서는 침수역으로 표현된다. 지형정보(지반고)를 파악하여 침수역인지 아닌지를 판단한다. 또한, 침수역이 지반역으로 변하는 경우에 발생할 수 있는 (-)수심에 대해서는 수심을 영(零)으로 하였다.

제3장 수치해석결과

3.1 폭풍해일

3.1.1 태풍경로 및 조건

Fig. 3.1~3.3은 본 연구에서 대상으로 하는 태풍 Sarah(5914)와 Thelma(8705) 및 Maemi(0314)의 진행경로를 나타내며, 그림으로부터 3개의 태풍은 남부연안을 통과하는 대표적인 정상진행경로라는 것을 알 수 있다. 태풍 Sarah(5914)는 한반도로 직접 상륙하지 않고 부산 앞바다를 통과하였으나, 태풍이 남해안에 상륙할 당시의 기압심도(대기압(1013hPa)과 태풍중심기압과의 기압차)가 68hPa로써 태풍 Maemi(기압심도 63hPa)나 Thelma(기압심도 43hPa)가 남해안에 상륙할 당시 보다 높은 수치를 나타내고 있다. 전라남도 고흥반도 인근으로 상륙하여 한반도의 중앙을 관통한 태풍 Thelma는 Rusa(0215) 이전 한반도에 내습한 태풍 가운데 재산피해로서는 최고를 기록하였다(이종섭 등, 1990). 또한, 과거최대태풍으로 인식되고 있는 태풍 Maemi는 경남 사천 부근의 해안으로 상륙하여 북북동진하여 경남 함안을 거쳐 경북 울진해안을 통해 동해상으로 빠져나갔다.

Fig. 3.4는 전술한 태풍의 이동경로를 공간적으로 비교한 것이다. 또한, 폭풍해일고의 산정을 위한 계산의 입력값으로서는 Table 3.1~3.3에 각각 나타내고 있는 시각에 따른 태풍의 위치(경도, 위도), 기압심도, 태풍반경 및 이동속도를 이용하였다.

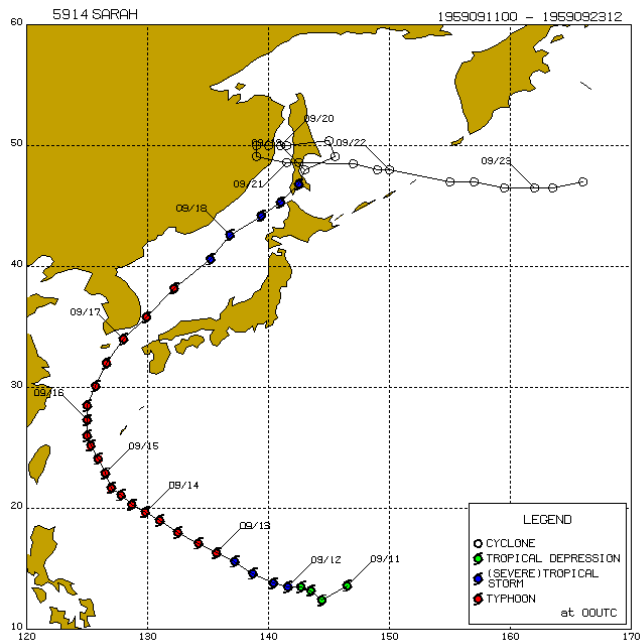


Fig. 3.1 Route of typhoon Sarah.

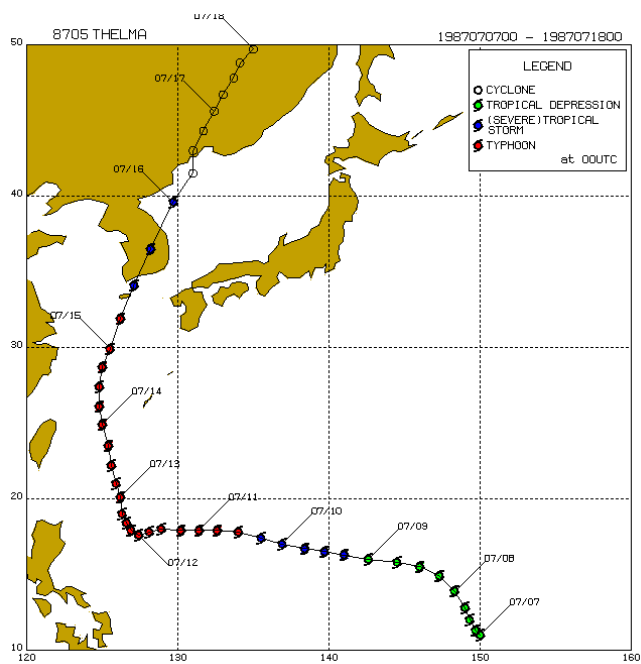


Fig. 3.2 Route of typhoon Thelma.

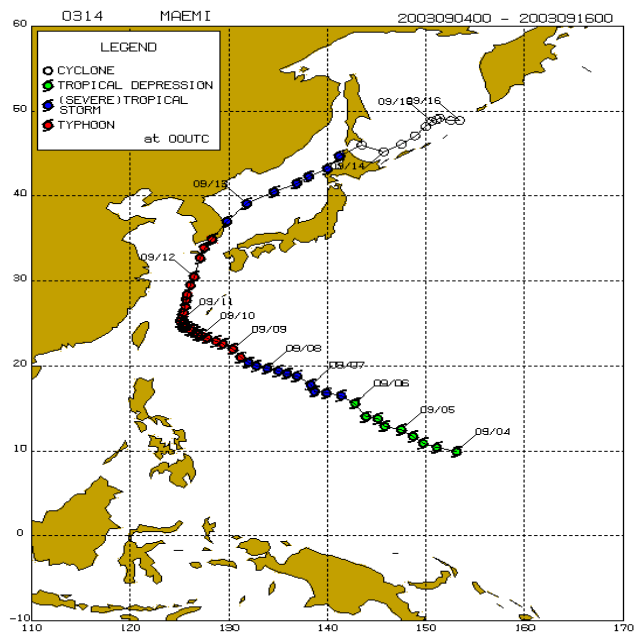


Fig. 3.3 Route of typhoon Maemi.

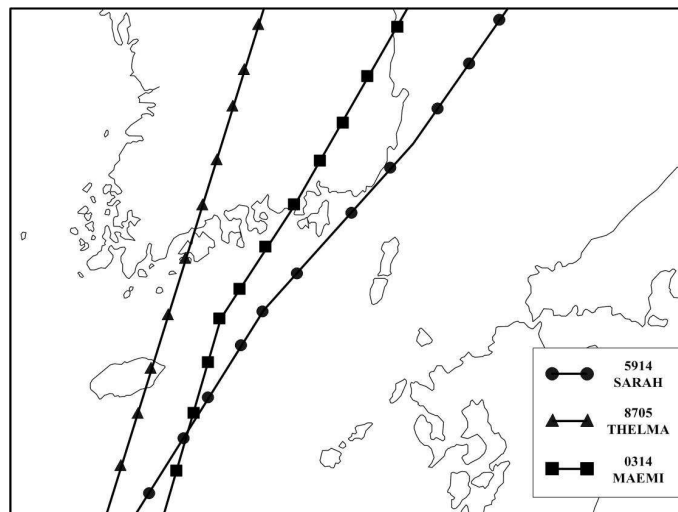


Fig. 3.4 Route of typhoons used in numerical simulation.

Table 3.1 Characteristics of typhoon Sarah.

시 각	경 도 (°E)	위 도 (°N)	기압심도 (hpa)	태풍반경 (km)	이동속도 (km/h)
5909151800	125.000	26.000	108.0	35.0	24.0
5909160000	125.000	27.300	108.0	33.0	22.2
5909160600	125.000	28.500	78.0	51.0	32.3
5909161200	125.700	30.100	78.0	52.0	37.4
5909161800	126.600	32.000	78.0	55.0	42.9
5909170000	128.000	34.000	68.0	71.0	44.1
5909170600	129.900	35.800	63.0	96.0	56.0
5909171200	132.200	38.200	48.0	134.0	62.0
5909171800	135.200	40.600	43.0	170.0	43.3

Table 3.2 Characteristics of typhoon Thelma.

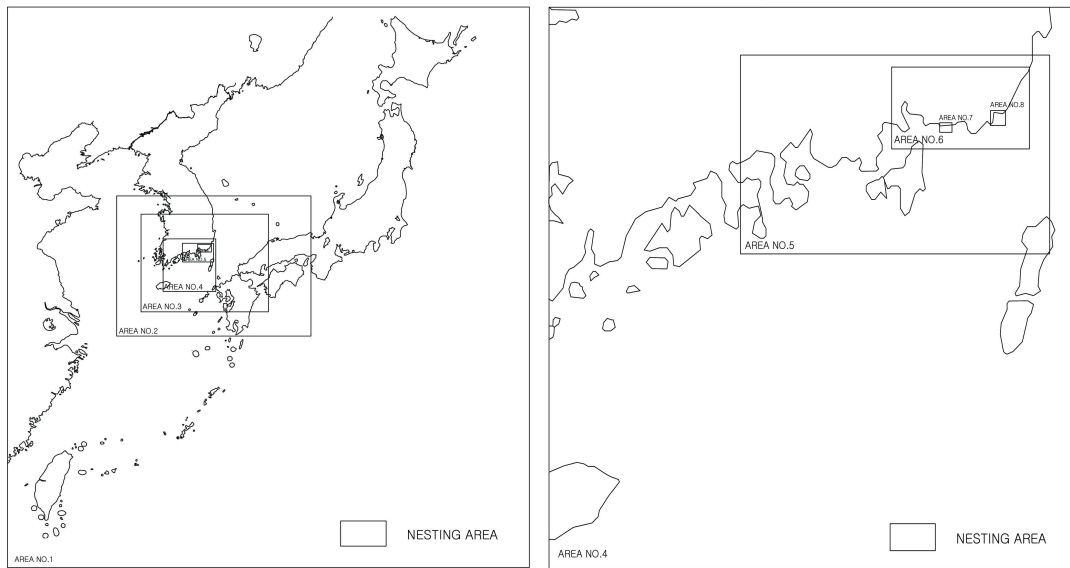
시 각	경 도 (°E)	위 도 (°N)	기압심도 (hpa)	태풍반경 (km)	이동속도 (km/h)
8707140600	124.800	26.100	68.0	96.0	24.0
8707141200	124.800	27.400	73.0	73.0	24.3
8707141800	125.000	28.700	68.0	85.0	23.6
8707150000	125.500	29.900	63.0	79.0	38.6
8707150600	126.200	31.900	58.0	112.0	43.0
8707151200	127.100	34.100	43.0	119.0	47.4
8707151800	128.200	36.500	38.0	158.0	61.4
8707160000	139.700	39.600	33.0	168.0	39.7
8707160600	131.000	41.500	33.0	199.0	27.8

Table 3.3 Characteristics of typhoon Maemi.

시 각	경 도 (°E)	위 도 (°N)	기압심도 (hpa)	태풍반경 (km)	이동속도 (km/h)
0309111500	125.300	25.900	0.0	38.0	10.0
0309111800	125.400	26.300	46.5	38.0	15.0
0309112100	125.600	27.000	83.0	38.0	20.0
0309120300	125.800	28.400	73.0	40.0	25.0
0309120600	126.100	29.500	68.0	40.0	30.0
0309120900	126.500	30.500	68.0	38.0	35.0
0309121200	126.900	31.700	68.0	38.0	35.0
0309121500	127.000	32.700	68.0	50.0	40.0
0309121700	127.300	33.500	68.0	55.0	40.0
0309122100	128.300	34.800	63.0	50.0	45.0
0309130300	129.700	36.900	43.0	90.0	45.0
0309131500	134.800	40.500	33.0	110.0	45.0

3.1.2 대상영역

폭풍해일 시뮬레이션의 대상영역은 Fig. 3.5(a)에 나타내는 것과 같이 태풍의 주경로가 놓이는 한국 및 일본과 태평양을 포함하는 광역으로 설정되었다. 대상으로 하는 관심영역에서 계산정도를 높이기 위하여 계산영역을 제1영역에서 제8영역까지 nesting하여 계산을 수행하였다. 계산격자의 구성은 제1영역에서 32.4km의 격자크기로 시작하여 순차적으로 16.2km, 5.4km, 1.8km, 600m, 200m의 격자간격을 이용하였으며, 관심영역인 제7~8영역 즉, Fig. 3.5(b)에 나타내는 부산 연안역에 있어서 최소격자간격은 100m로 설정하였다. Table 3.4에는 격자에 대한 상세한 정보가 제시되어 있으며, Imesh와 Jmesh는 I,J 방향으로 격자의 갯수를 나타낸다. Fig. 3.6은 Fig. 3.5에 나타낸 각 영역에서 보다 상세한 영역범위와 등수심선을 나타내고 있다.



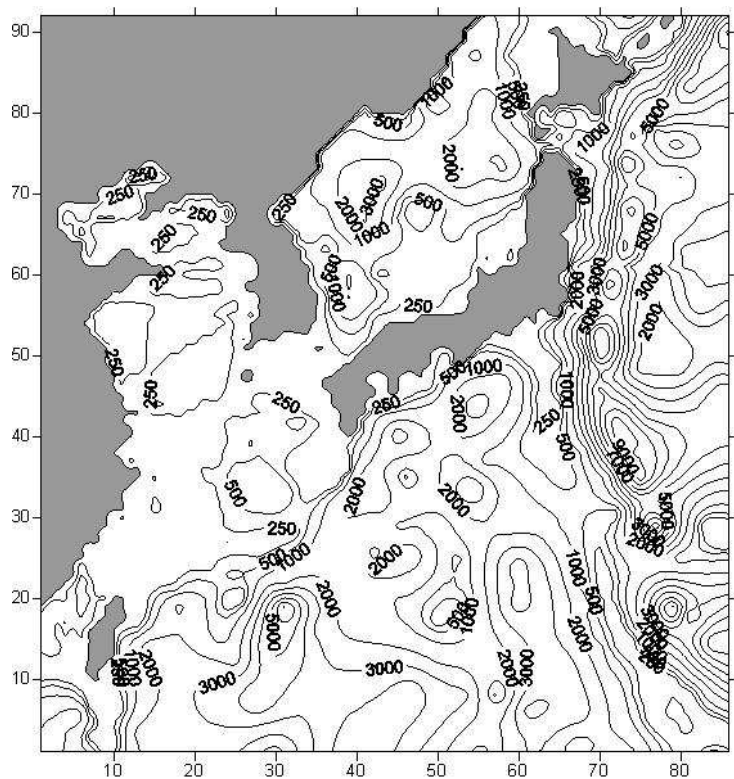
(a) Wide area(NO.1~4)

(b) Object area(NO.4~8)

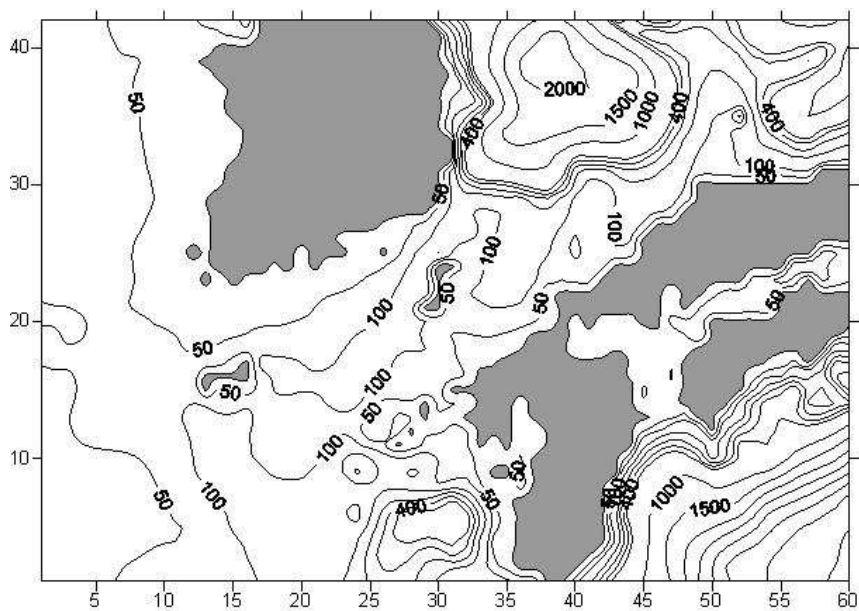
Fig. 3.5 Area of storm surge simulation.

Table 3.4 Mesh sizes applied to each simulating area.

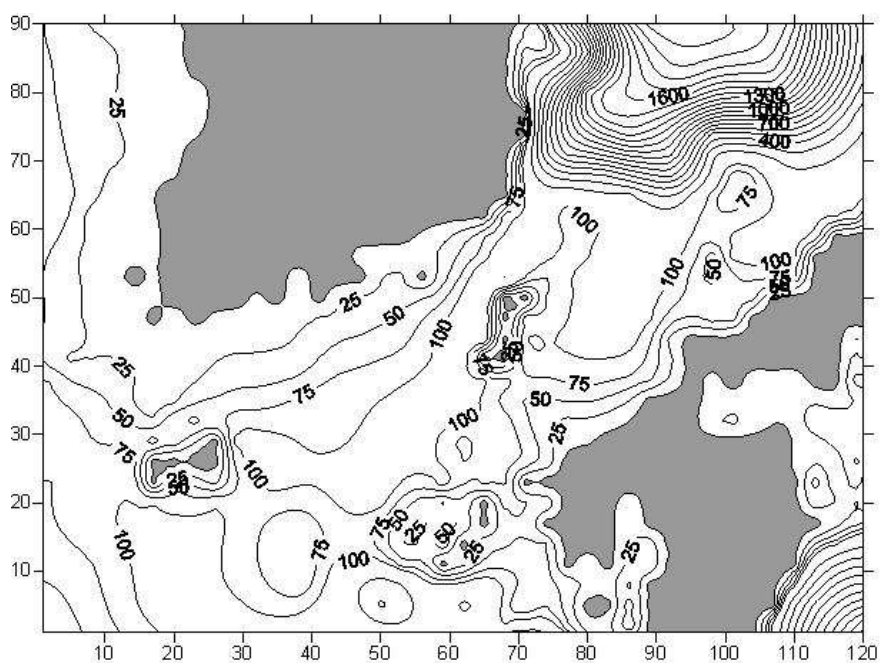
영역 번호	Mesh size(m)	I _{mesh} × J _{mesh}
AREA NO.1	32,400	86×72
AREA NO.2	16,200	60×42
AREA NO.3	5,400	120×90
AREA NO.4	1,800	180×150
AREA NO.5	600	270×159
AREA NO.6	200	363×198
AREA NO.7	100	122×84
AREA NO.8	100	60×72



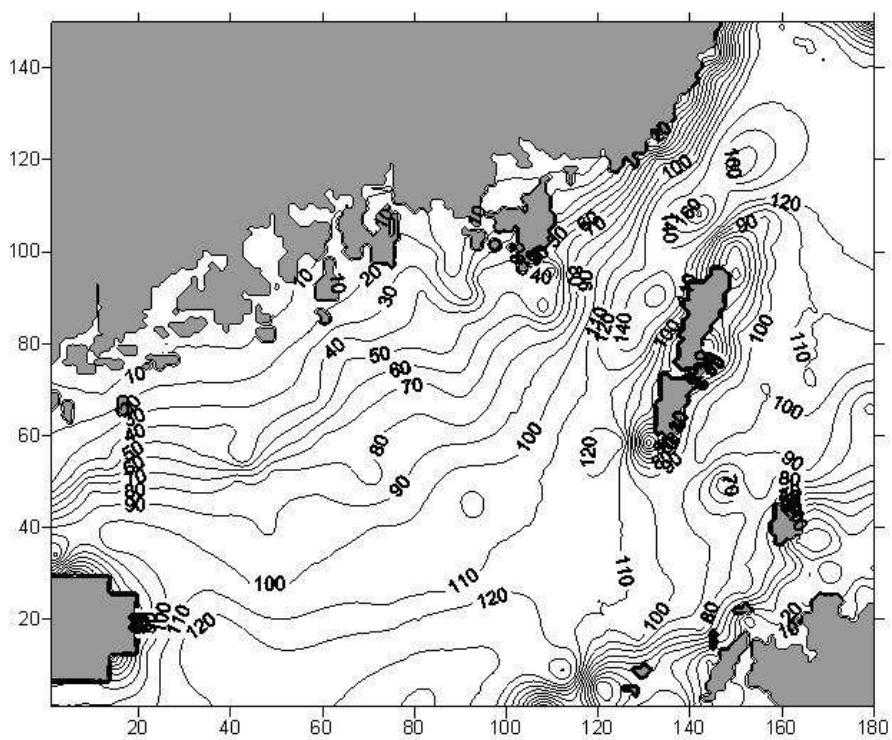
(a) AREA NO.1



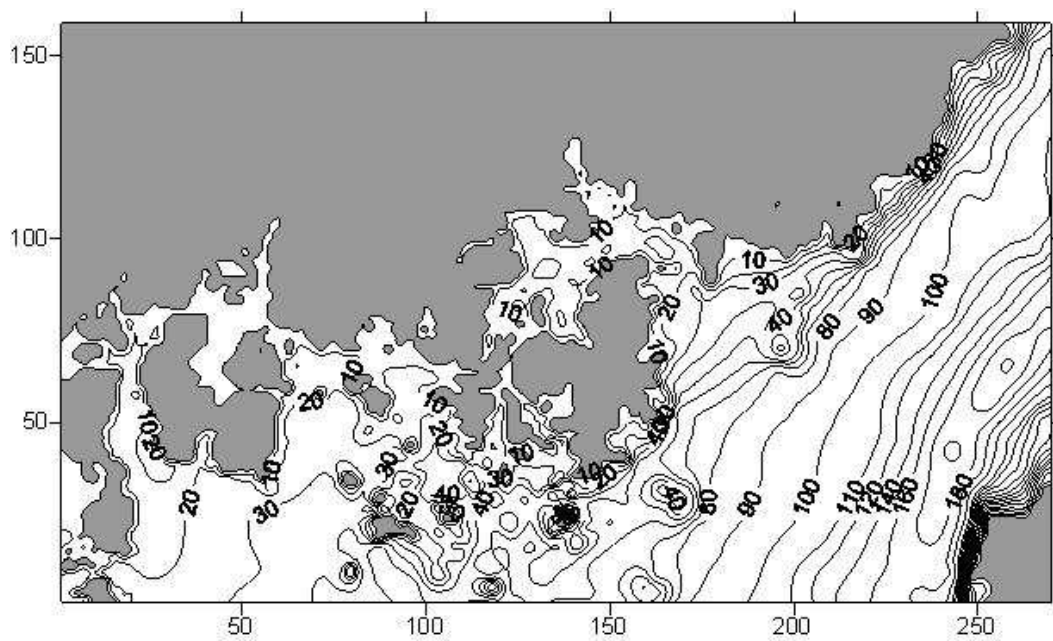
(b) AREA NO.2



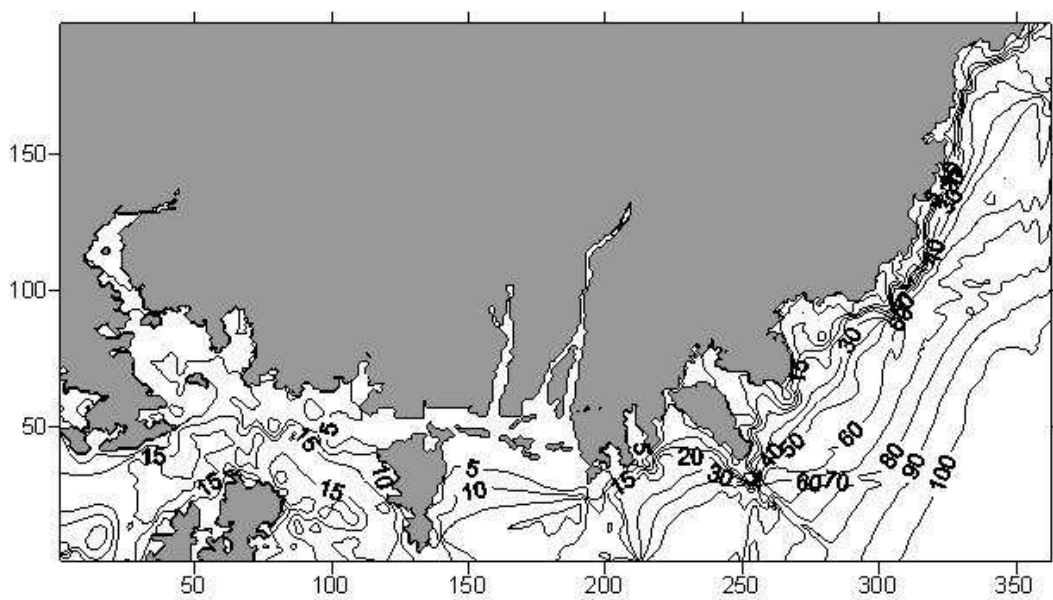
(c) AREA NO.3



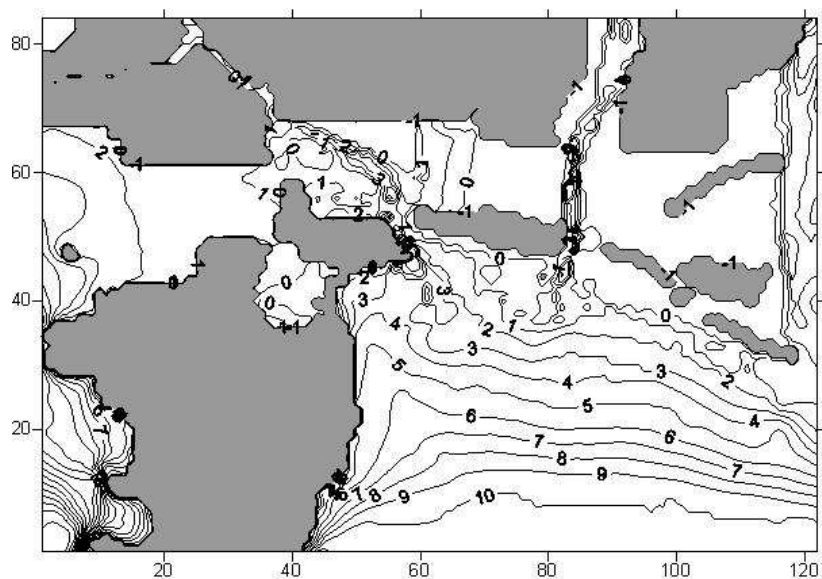
(d) AREA NO.4



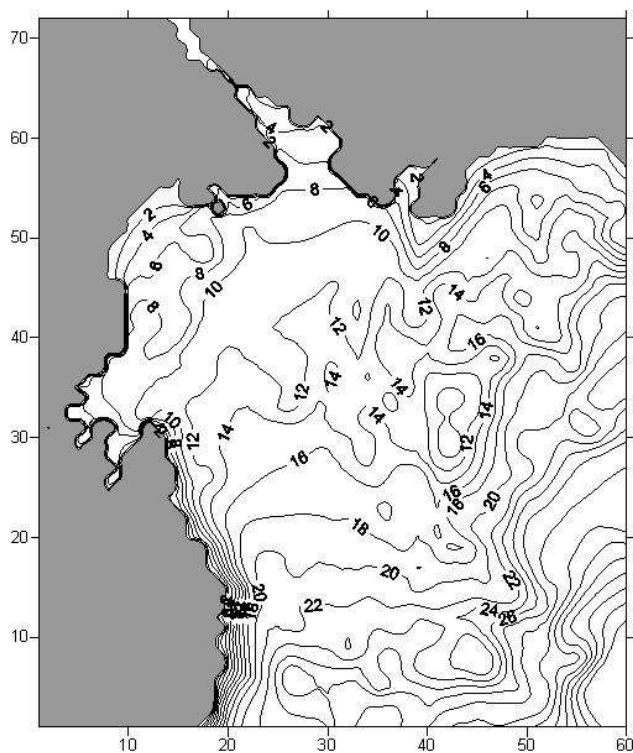
(e) AREA NO.5



(f) AREA NO.6



(g) AREA NO.7



(h) AREA NO. 8

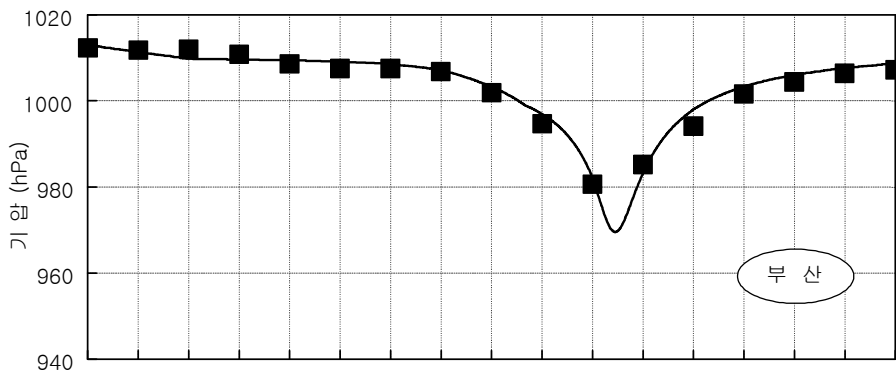
Fig. 3.6 Spatial distribution of water depth.

3.1.3 수치계산의 검증

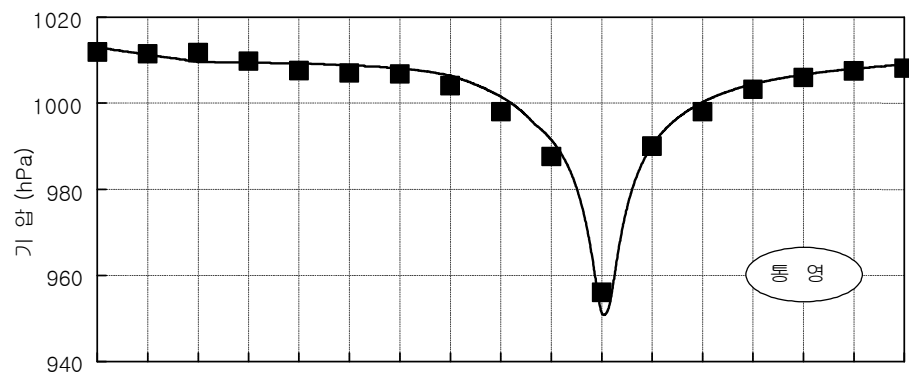
(1) 기압

폭풍해일고의 시뮬레이션을 실시함에 있어서 우선 2003년 9월 12일 태풍 Maemi에 대한 수치계산을 수행하여 본 수치시뮬레이션의 타당성을 검토하였다. 폭풍해일의 추산에 이용된 기압분포에는 식(2.28)의 Myers and Malkin(1961) 분포식을 사용하였고, 최대풍속 반경 r_0 는 남해안의 관측기압으로부터 산정되었다.

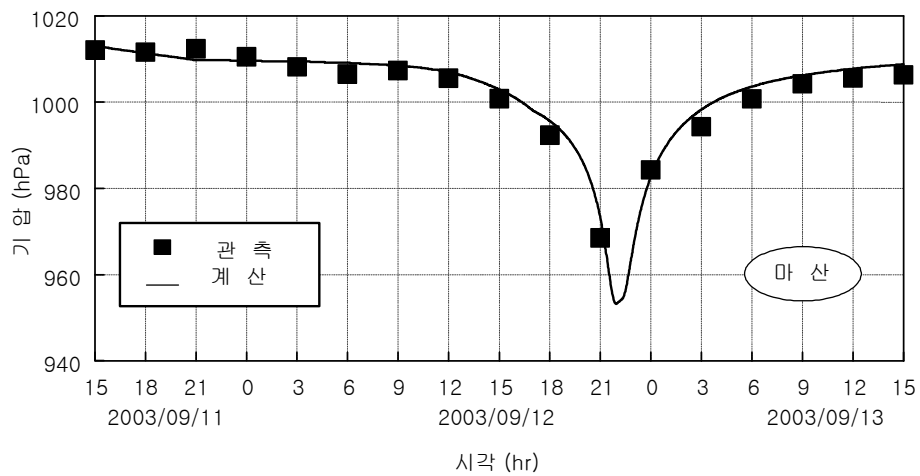
Fig. 3.7은 태풍 Maemi 통과시에 기상대에서 관측된 기압과 수치시뮬레이션에 의한 기압의 시간변화를 비교한 결과이다. 종축과 횡축은 각각 시각 및 기압변화를 나타내고, 짙은 사각형은 관측치를, 실선은 계산치를 각각 나타낸다. 부산의 경우에는 최저기압이 971hPa정도로, 이는 태풍 Maemi시의 최저기압 950hPa보다는 큰 값을 나타내고 있다. 이는 태풍의 중심경로보다 부산이 우측으로 떨어져 있었기 때문으로 판단된다. 반면에, 중심경로(경남 사천시)에 보다 가까운 통영과 마산으로 갈수록 중심기압이 954hPa과 951hPa 정도의 값을 나타내고 있으며, 최저기압 950hPa에 가까운 수치를 나타낸다. Fig. 3.7을 통해 알 수 있는 바와 같이 시각의 변화에 따라 각 지역에서의 기압의 변화는 관측치 및 해석치 모두 전체적으로 잘 일치하는 경향을 알 수 있다.



(a) Busan



(b) Yongyeong



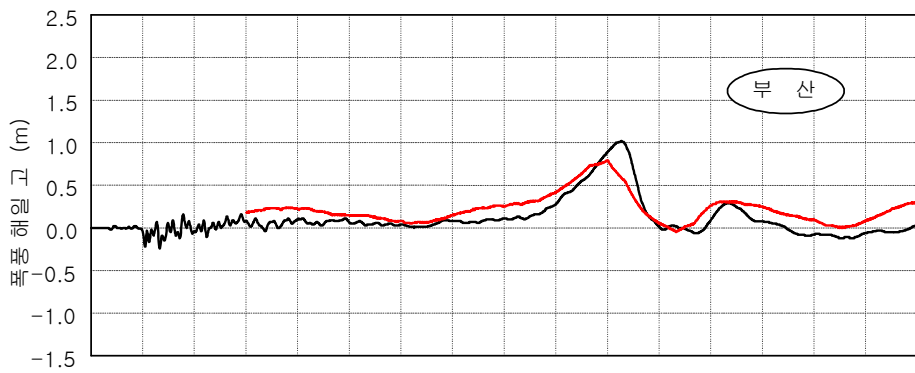
(c) Masan

Fig. 3.7 Comparison of atmospheric pressure between measured and calculated results for typhoon Maemi.

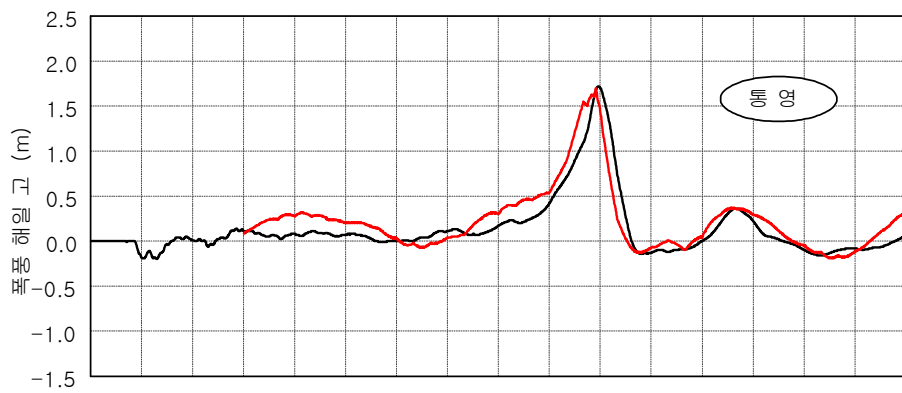
(2) 폭풍해일고

태풍 Maemi 내습시에 부산 연안에 설치되어 있는 파랑관측소 및 검조소로부터 폭풍해일고(기록조위-예측조위)를 얻을 수 있지만, 고파랑에 의한 유실 및 결측 등으로 신뢰할 수 있는 조위기록은 많지 않다. 폭풍해일고에 대해서 부산항 검조소와 인근 마산항 및 통영 검조소의 기록과 비교·검토하여 수치시물레이션에 의한 결과의 타당성을 검증하고자 한다.

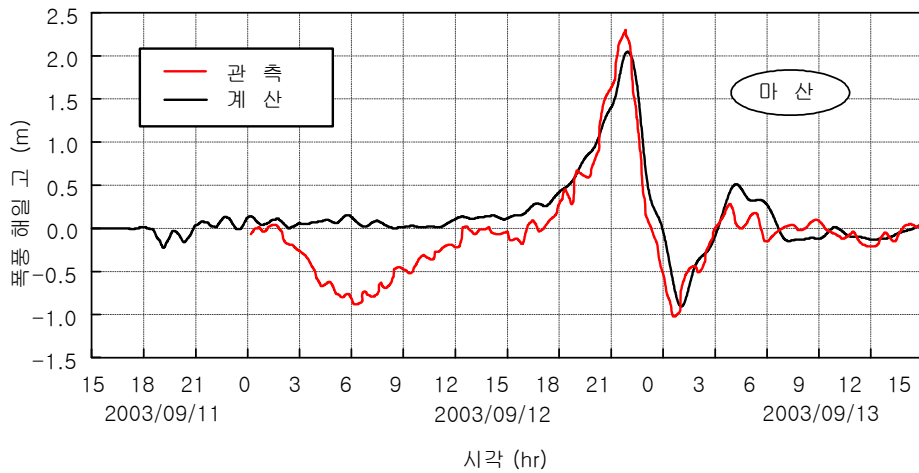
Fig. 3.8은 태풍 Maemi 통과시에 각 검조소에서 관측된 폭풍해일고와 수치시물레이션에 의한 폭풍해일고의 시간변화를 비교한 결과이다. 부산항 검조소에서 관측된 해일고와 해석된 해일고를 비교한 결과를 보면 폭풍해일고의 최대치가 발생하는 시각에서 계산결과가 약간 늦게 나타난다. 그 값에서 관측치는 0.8m 정도이고 계산치는 1.0m 정도를 나타내어 계산치가 다소 큰 값을 나타내지만 만족스러운 대응성을 갖는 것으로 판단된다. 통영 검조소에서 얻어진 관측결과와 계산결과를 비교한 것을 보면 부산항 검조소와 마찬가지로 피크치에서 계산결과가 약간 늦게 나타난다. 피크치는 관측이 1.65m, 계산이 1.72m로 매우 잘 일치하며, 동시에 시각의 변화에 따른 폭풍해일고의 변화과정도 매우 잘 일치하는 것으로 판단된다. 마산항 검조소에서 관측된 해일고와 본 연구에서 해석된 해일고를 비교한 결과에서 태풍이 본격적으로 상륙하기 전인 2003년 9월 11일 06시 전후의 관측기록에서 해일고가 하강하고 있는 현상은 일반적으로 이해될 수 없는 현상이며, 이는 기계의 오작동으로 판단된다. 이 부분을 제외하면 시각의 변화에 따른 폭풍해일고의 변화는 매우 잘 일치하는 것으로 판단되며, 여기서 피크치를 나타내고 있는 2003년 9월 12일 22시 전후에서 관측치는 2.3m 정도, 해석치는 2.1m 정도로 약간의 차이를 나타내고 있지만, 미소한 것으로 여겨진다. 폭풍해일고의 피크치에서 계산치가 약간 과소평가되고 있지만, 계산치와 관측치와의 전반적인 일치성을 살펴보면 계산치는 관측치를 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Busan



(b) Tongyeong



(c) Masan

Fig. 3.8 Comparison of storm surge height between measured and calculated results for typhoon Maemi.

3.1.4 기압장과 바람장의 해석

(1) 태풍 Sarah의 기압장과 바람장

Fig. 3.9는 태풍 Sarah 통과시에 우리나라의 주변에 나타나는 기압장과 바람장을 시각별로 나타낸 결과이다. 본 연구에서는 태풍의 중심에 원점을 둔 Myers and Malkin(1961)에 의한 결과식으로부터 산정되는 경도풍을 적용하고 있기 때문에 결과로부터도 알 수 있는 바와 같이 반시계방향으로 동심원상의 기압장과 바람장이 형성되어 있다.

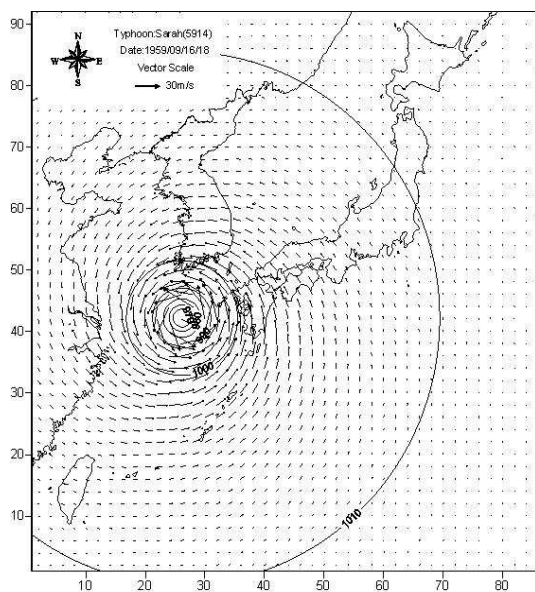
해석결과에 의하면 태풍이 남해안에 접근할수록 태풍반경과 중심기압이 커지는 것을 알 수 있고, 역으로 풍속은 감소하는 결과를 나타낸다. 이의 결과는 전술한 Table 3.1의 조건으로부터도 확인할 수 있다.

(2) 태풍 Thelma의 기압장과 바람장

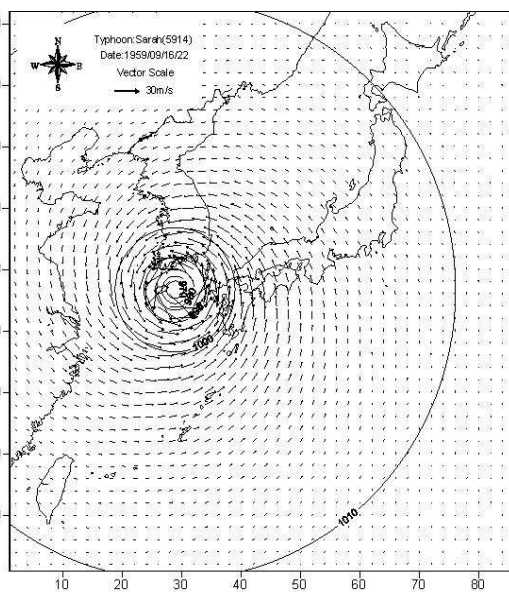
Fig. 3.10은 태풍 Thelma 통과시에 우리나라의 주변에 나타나는 기압장과 바람장을 시각별로 나타낸 결과이다. 태풍이 남해안에 접근할수록 태풍반경과 중심기압에서 약간의 변동이 있지만, 전반적으로 커지고 풍속은 감소하는 결과를 나타낸다. 전술한 Sarah의 결과와 비교하면 중심기압이 크고 풍속은 작다. 이의 결과는 전술한 Table 3.2의 조건으로부터도 확인할 수 있다.

(3) 태풍 Maemi의 기압장과 바람장

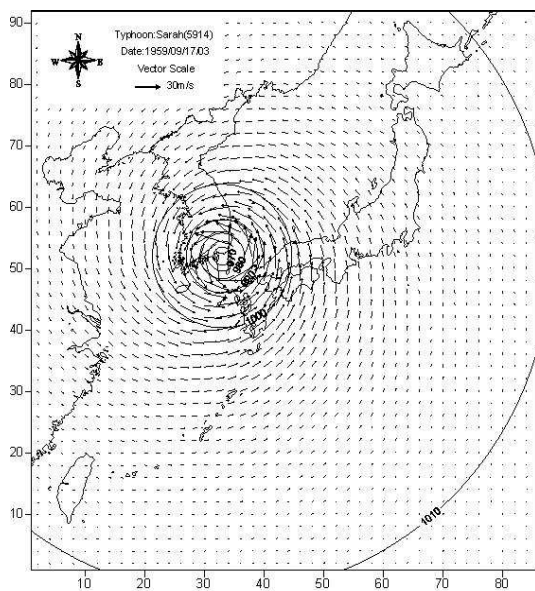
Fig. 3.11은 태풍 Maemi 통과시에 우리나라의 주변에 나타나는 기압장과 바람장을 시각별로 나타낸 결과이다. 태풍이 남해안에 접근할수록 태풍반경과 중심기압에서 약간의 변동이 있지만, 전반적으로 커지고 풍속은 감소하는 결과를 나타낸다. 전술한 Sarah의 결과와 비교하면 태풍반경은 작고 경로가 다르지만 규모로써는 거의 동등한 것으로 판단된다. 이의 결과는 전술한 Table 3.3의 조건으로부터도 확인할 수 있다.



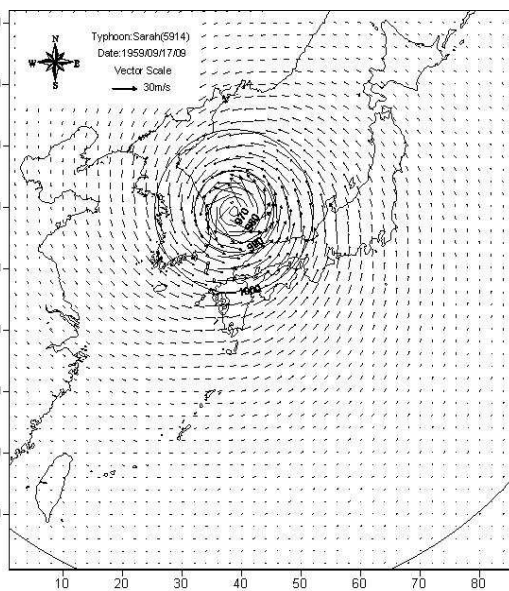
1) 1959.09.16.18



2) 1959.09.16.22

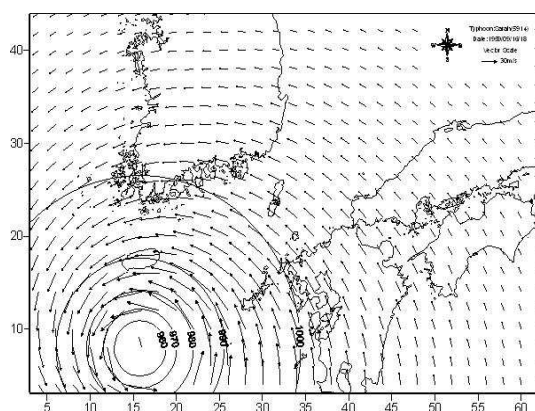


3) 1959.09.17.03

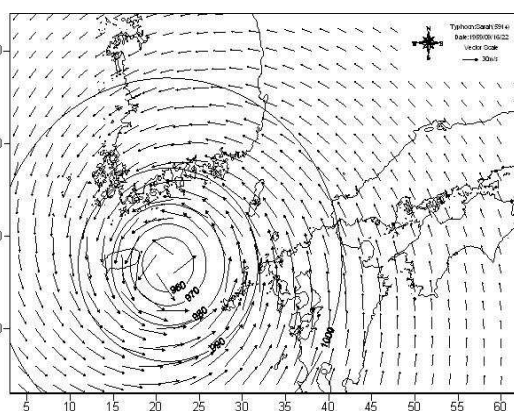


4) 1959.09.17.09

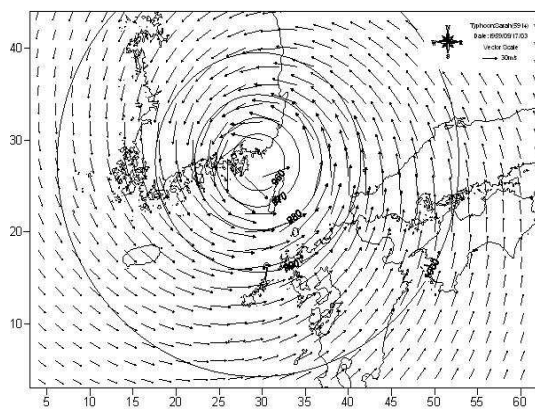
(a) AREA NO.1



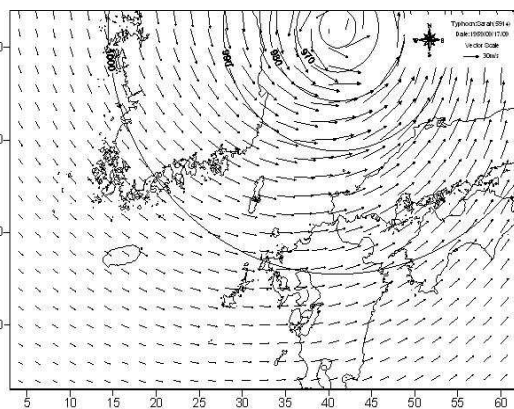
1) 1959.09.16.18



2) 1959.09.16.22



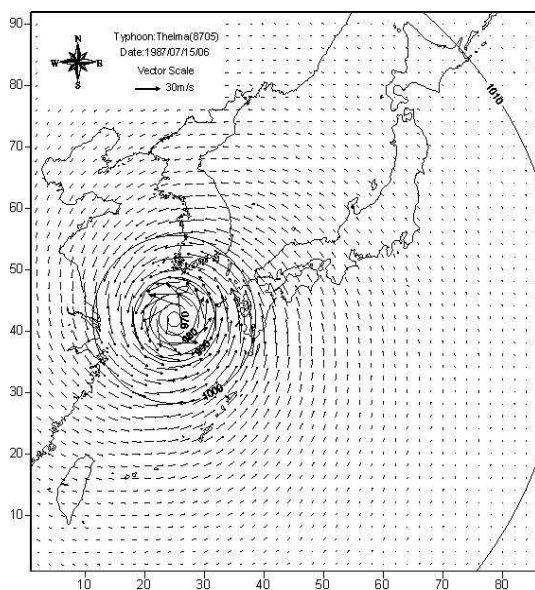
3) 1959.09.17.03



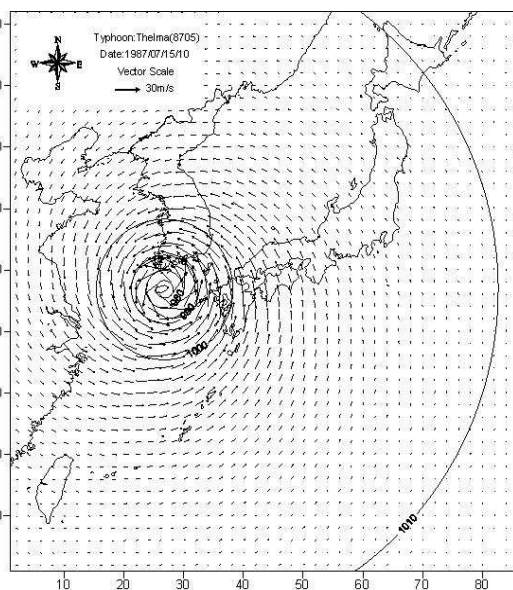
4) 1959.09.17.09

(b) AREA NO.2

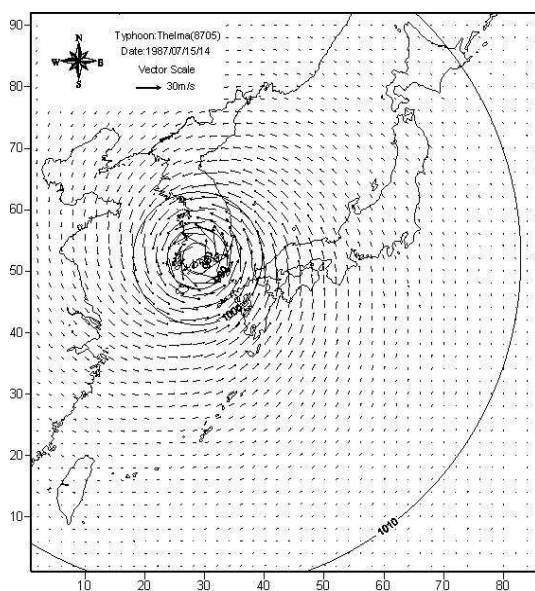
Fig. 3.9 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Sarah.



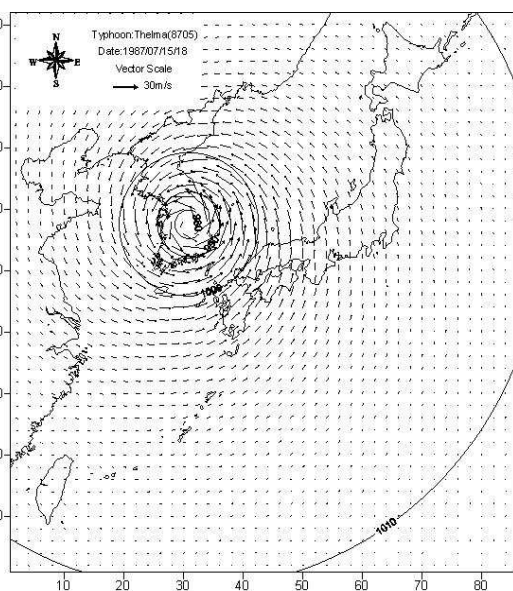
1) 1987.07.15.06



2) 1987.07.15.10

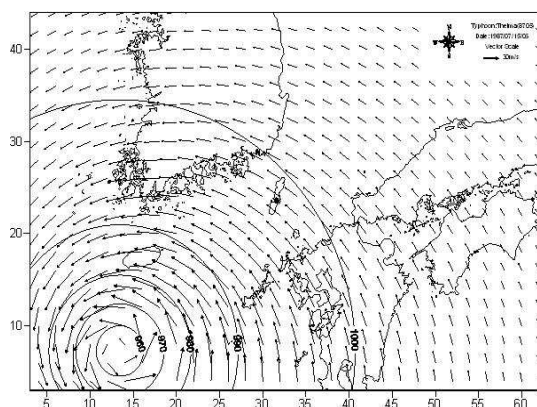


3) 1987.07.15.14

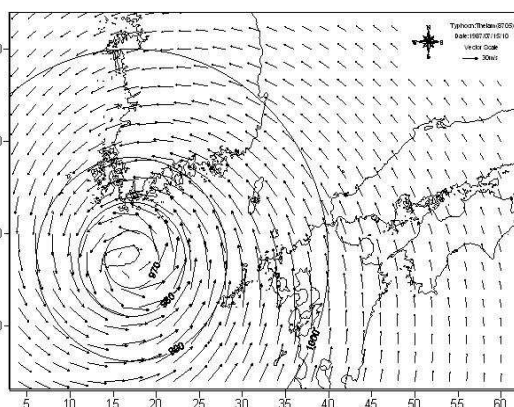


4) 1987.07.15.18

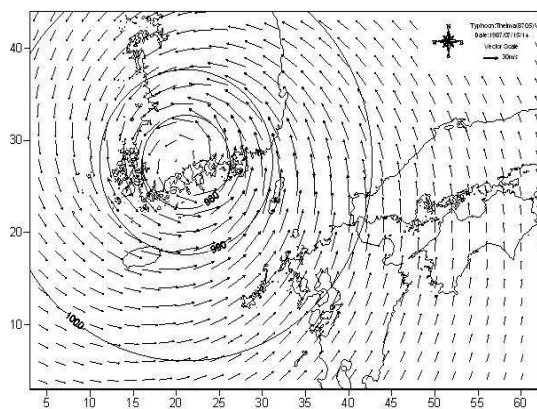
(a) AREA NO.1



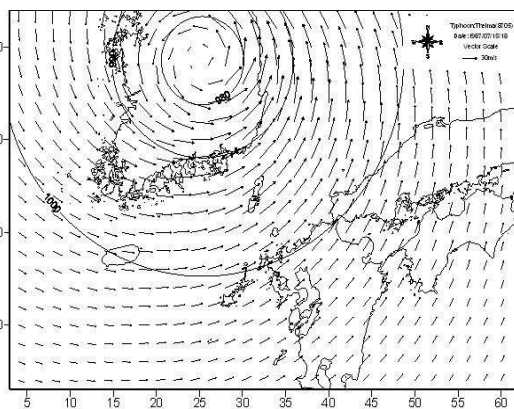
1) 1987.07.15.06



2) 1987.07.15.10



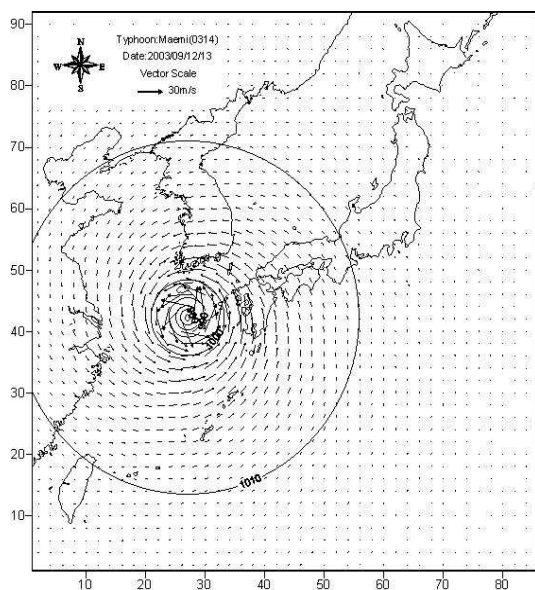
3) 1987.07.15.14



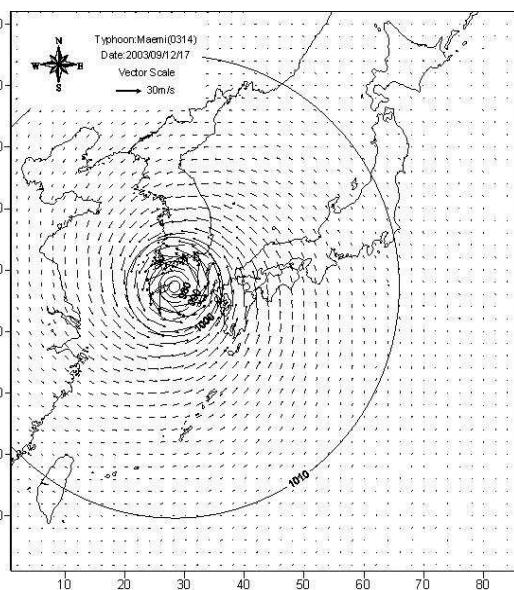
4) 1987.07.15.18

(b) AREA NO.2

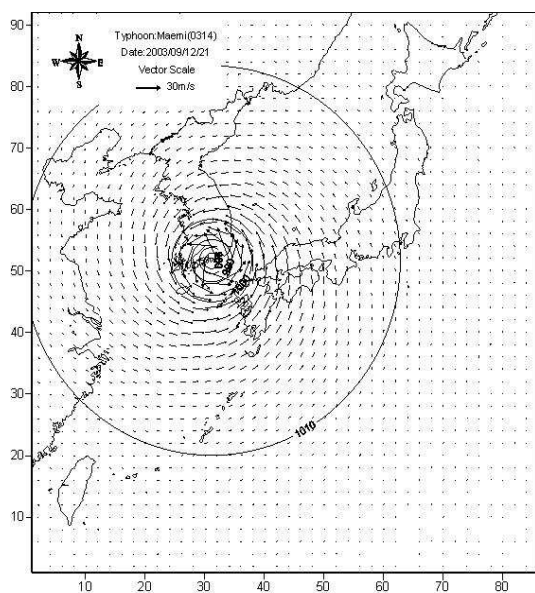
Fig. 3.10 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Thelma.



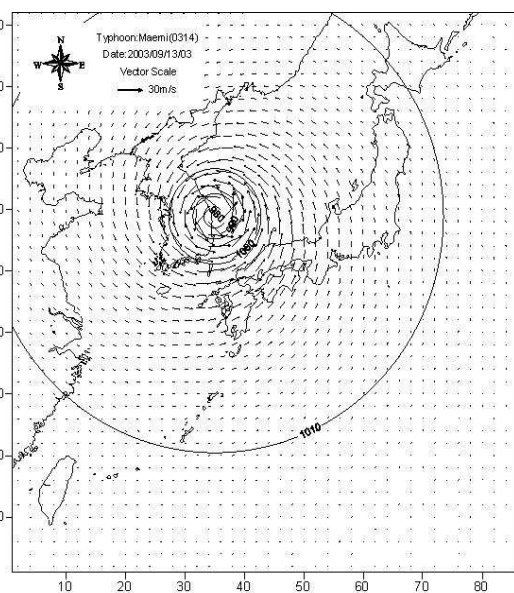
1) 2003.09.12.13



2) 2003.09.12.17

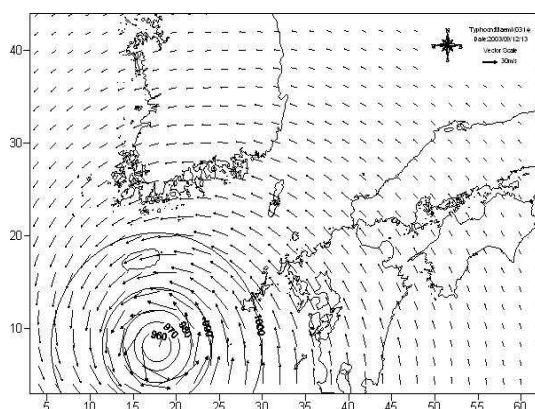


3) 2003.09.12.21

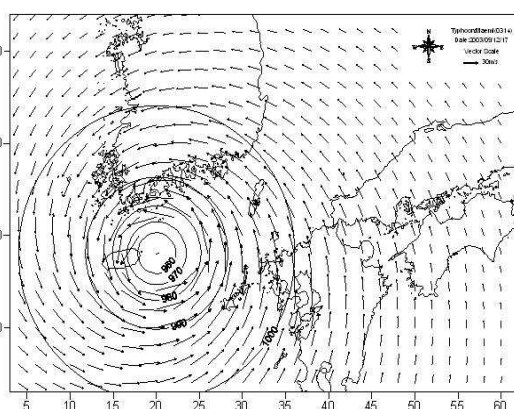


4) 2003.09.13.03

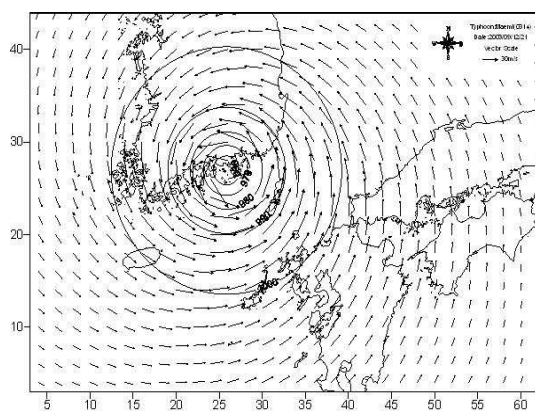
(a) AREA NO.1



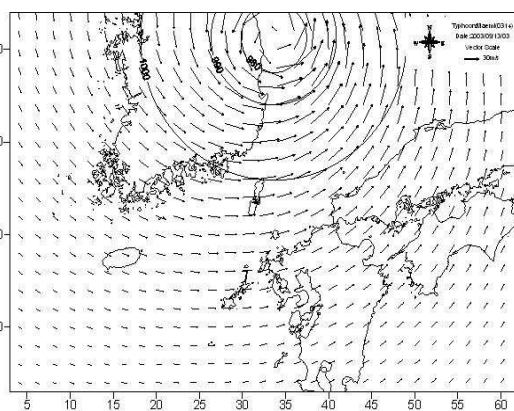
1) 2003.09.12.13



2) 2003.09.12.17



3) 2003.09.12.21



4) 2003.09.13.03

(b) AREA NO.2

Fig. 3.11 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Maemi.

3.1.5 폭풍해일고

Fig. 3.12는 태풍 Sarah 내습시에, Fig. 3.13은 태풍 Thelma 내습시에, Fig. 3.14는 태풍 Maemi 내습시에 부산 연안해역에서 발생한 최대폭풍해일고의 공간분포를 나타낸 결과이다. 부산 연안역에 막대한 해안재해를 유발한 태풍 Sarah, Thelma 및 Maemi에 대해 가덕도에서부터 고리에 이르기까지 최대폭풍해일고의 공간분포를 검토하였다. 전체적으로 태풍 Thelma에 의한 폭풍해일고가 다른 2개의 태풍에 의한 값보다도 상당히 적은 값을 나타내는 것을 알 수 있었다.

부산 연안해역의 각 지점에 대해서 태풍 Sarah, Thelma 및 Maemi에서 얻어진 최대폭풍해일고를 Fig. 3.15에서 보여지는 지점별로 비교한 결과를 Table 3.5에 나타낸다. 이 결과로 각 지역에서 폭풍해일고를 결정할 경우에 어느 태풍에 의한 폭풍해일고를 적용하는 것이 합리적인가를 알 수 있으며, 태풍 Maemi의 경우는 괴정천에서 제일 큰 값 1.9m를 나타내고, 다대포→부산항→광안리→해운대→송정→기장으로 갈수록 작은 값을 나타내며, 최소값은 고리 원자력 발전소 전면해역에서 0.7m를 갖는다. 태풍 Thelma의 경우는 앞에서 언급한 바와 같이 전체적으로는 태풍 Sarah 및 Maemi보다는 상대적으로 작은 값을 나타내지만, 역시 괴정천에서 제일 큰 값 0.88m를 나타내고, 태풍 Maemi와 같이 다대포에서 기장으로 갈수록 작은 값을 나타내며, 최소치는 일광해수욕장의 전면해역에서 0.41m를 나타낸다. 태풍 Sarah의 경우는 녹산공단 전면해역에서 제일 큰 값 1.41m를 나타내고, 부산항에서 1.35m를 기록한 다음, 전반적으로 대략 1.0~1.1m 정도를 값을 나타내고 있다. 여기서, 가덕도, 녹산공단 및 괴정천 부근의 해역에서는 검토된 3개의 태풍에 모두에 대해서 가장 큰 폭풍해일고가 발생하는 지역이라는 것을 알 수 있다.

이상에서와 같이 각 지역에 있어서 최대폭풍해일고의 값은 3개의 태풍에 대해 각각 상이하므로 폭풍해일고에 대한 설계대상폭풍은 달라지게 된다. 얻어진 결과에 따르면 가덕도 천성항, 부산신항 전면, 녹산공단 전면 및 괴정천의 경우는 태풍 Maemi에 의한 폭풍해일고가 제일 크게 나타나고 있고, 검토된 다른 해역에서는 태풍 Sarah에 의한 폭풍해일고가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 태풍경로의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 태풍 Maemi의 경우는 경남 사천지방을 통과하였기 때문에 부산 연안해역이 태풍의 진로에 우측에 놓인 반면(가항반원)에, 태풍 Sarah의 경우는 부산 연안해역을 약간 벗어난 남동해안을 통과하였지만, 태풍의 중심세력은 부산 연안해역에 직접적인 영향을 주었고, 상대적으로 부산 연안해역의 동측에 있는 부산항에서 고리까

지의 해역에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.



(a) AREA NO.6



(b) AREA NO.7



(c) AREA NO.8

Fig. 3.12 Spatial distribution of storm surge height for typhoon Sarah.



(a) AREA NO.6

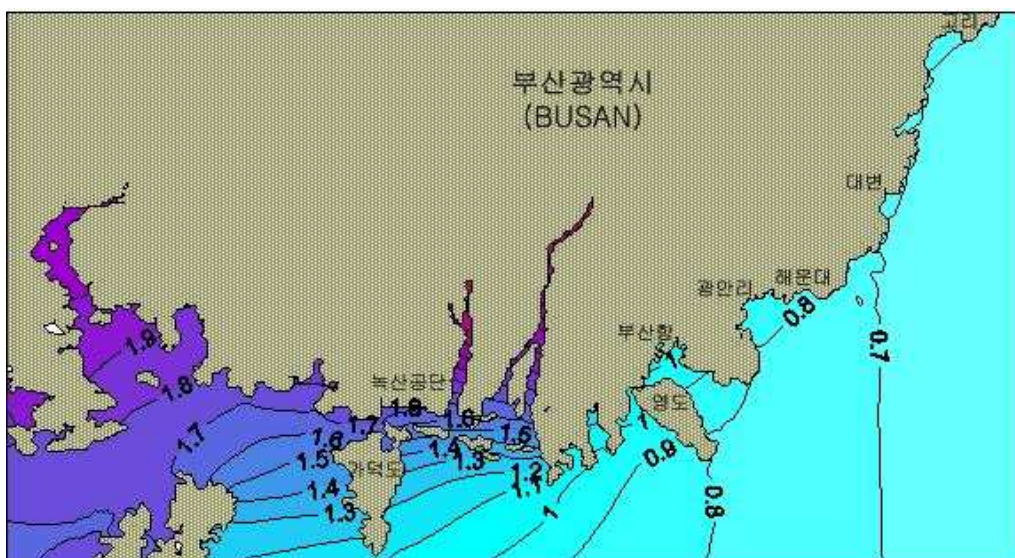


(b) AREA NO.7



(c) AREA NO.8

Fig. 3.13 Spatial distribution of storm surge height for typhoon Thelma.



(a) AREA NO.6



(b) AREA NO.7



(c) AREA NO.8

Fig. 3.14 Spatial distribution of storm surge height for typhoon Maemi.

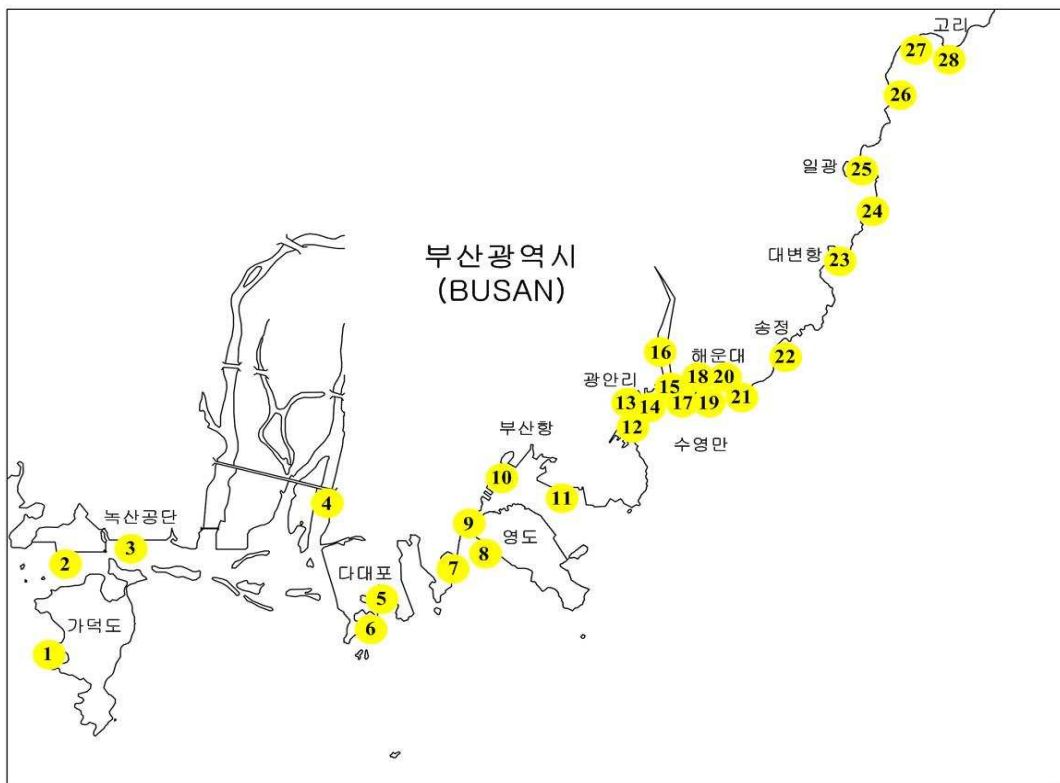


Fig. 3.15 Calculating position of storm surge height in Busan coast.

Table 3.5 Maximum storm surge height in cases of typhoon Sarah, Thelma and Maemi.

Point	계산지점	Sarah(m)	Thelma(m)	Maemi(m)
No.1	가덕도 천성항	1.10	0.63	1.36
No.2	부산신항 전면	1.06	0.75	1.71
No.3	녹산공단 전면	1.41	0.80	1.69
No.4	괴정천	1.17	0.88	1.90
No.5	다대포(上)	1.16	0.56	1.09
No.6	다대포(下)	1.17	0.56	1.08
No.7	송도해수욕장	1.19	0.54	1.03
No.8	영도남항동	1.18	0.55	1.05
No.9	부산항검조소	1.26	0.54	1.02
No.10	부산항	1.35	0.54	1.01
No.11	감만컨테이너 야적장	1.14	0.50	0.91
No.12	삼익비치 전면호안	1.10	0.46	0.83
No.13	광안리해수욕장	1.12	0.48	0.86
No.14	유희장	1.09	0.47	0.85
No.15	수변공원	1.07	0.47	0.84
No.16	수영강	1.10	0.48	0.86
No.17	한화콘도	1.05	0.46	0.82
No.18	해상관광호텔	1.03	0.46	0.83
No.19	동백섬	1.02	0.46	0.81
No.20	해운대해수욕장	1.04	0.46	0.81
No.21	해운대 미포항	1.01	0.46	0.81
No.22	송정해수욕장	1.02	0.43	0.77
No.23	대변항	1.00	0.43	0.75
No.24	두호항	0.97	0.42	0.72
No.25	일광해수욕장	1.03	0.41	0.72
No.26	칠암항	0.98	0.41	0.71
No.27	임랑해수욕장	1.00	0.45	0.75
No.28	고리원자력발전소	0.91	0.42	0.70

3.2 MASCON모델에 의한 바람장

3.2.1 대상영역 및 조건

전절에서 부산 연안역에 태풍 Sarah, Thelma, Maemi에 대해서 폭풍해일고를 추정하였다. 그 결과 태풍 Thelma에 의해 추정된 폭풍해일고가 다른 2개의 태풍에 의한 해일고보다 상당히 적은 값을 나타내었기 때문에 본 절에서는 태풍 Sarah와 Maemi에 대해서만 검토한다.

MASCON모델의 계산에서 대상영역은 태풍의 주경로를 포함한 Fig. 3.16과 같은 영역으로 설정되었으며, 격자크기는 600m, Imesh×Jmesh는 247×166이다. 계산에 필요한 입력치(기압심도, 태풍반경, 이동속도)는 태풍 Sarah에 대해서 Table 3.1, 태풍 Maemi에 대해서 Table 3.3에 제시된 값을 사용하였다.

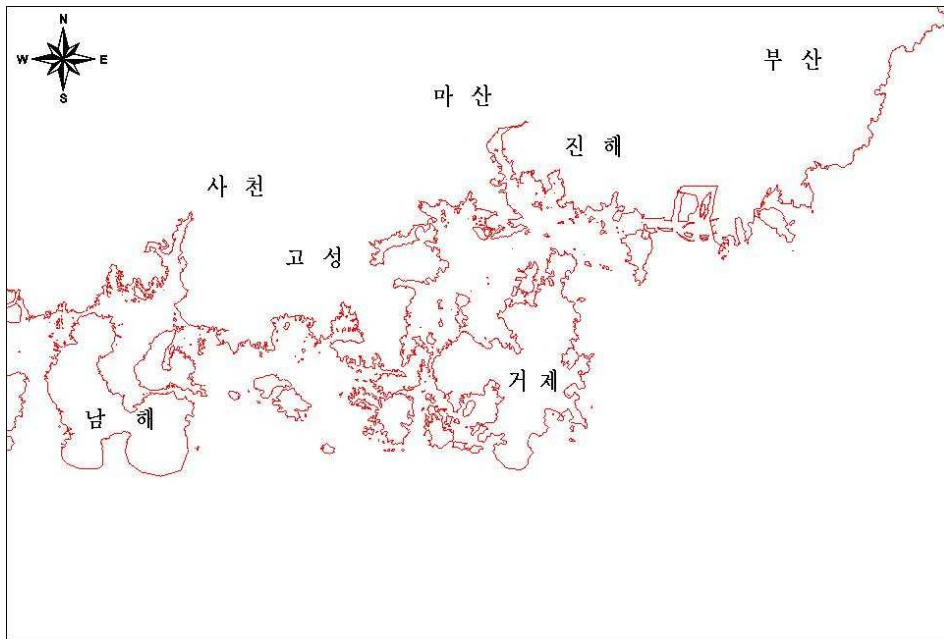


Fig. 3.16 Simulation area for MASCON model.

3.2.2 타당성 검증

태풍 Maemi와 태풍 Sarah에 대해서 기압, 태풍반경, 이동속도 등을 고려하여 태풍 Maemi 내습시 최대폭풍해일고의 발생시간인 2003년 09월 12일 22시의 해상풍을 산정한 결과가 Fig. 3.17에 주어져 있고, 같은 시간에 MASCON모델로 추정된 지형의 영향이 고려된 해상풍이 Fig. 3.18에 주어져 있다. Fig. 3.17과 Fig. 3.18을 비교하면 태풍의 중심이 육상에 존재하기 때문에 그 위치가 명확하지 않지만 중심의 위치를 잘 재현하고 있는 것으로 판단되며, 전반적으로 관측치와 비슷한 값을 재현하고 있으므로 지형의 영향이 고려된 것을 확인할 수 있다. Fig. 3.19는 태풍 Sarah 내습시 최대폭풍해일고의 발생시간인 1959년 09월 17일 03시의 해상풍을 나타내고, Fig. 3.20은 동시간에 MASCON모델에 의해 지형의 영향이 고려된 해상풍을 보여준다. Fig. 3.19와 Fig. 3.20을 비교하면 해상풍에서의 중심이 MASCON모델에 의해 지형이 고려되면서 위치가 약간 변하는 것을 볼 수 있다. 이는 지형의 영향으로 인하여 풍향과 풍속의 변화가 무풍지대의 풍향과 풍속에 영향을 미친 것이라 판단되며, 전반적으로 지형에 의한 바람장의 변화를 MASCON모델이 잘 재현하는 것으로 판단된다.

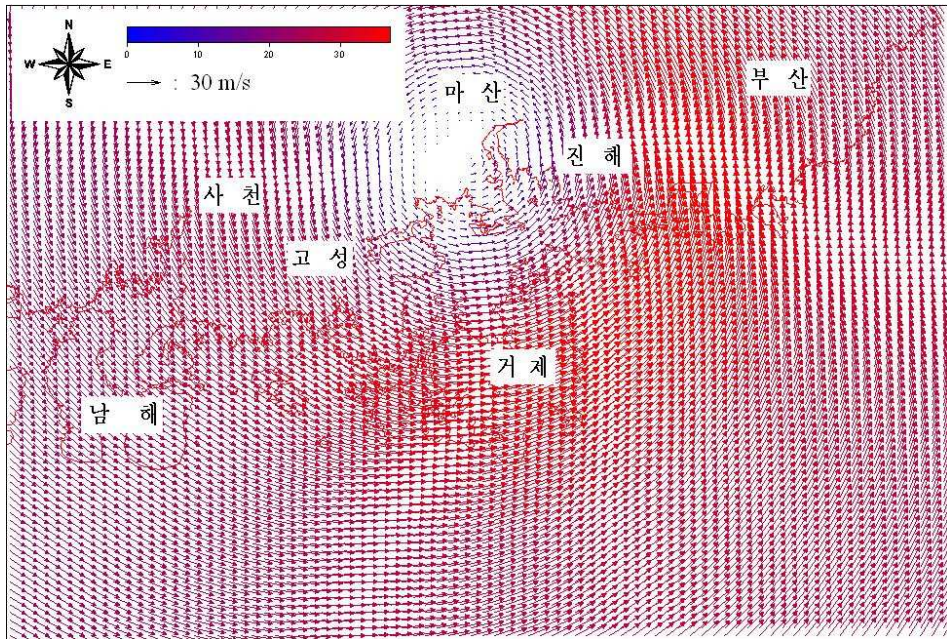


Fig. 3.17 Sea wind field calculated by Eq.(2.30) for typhoon Maemi.

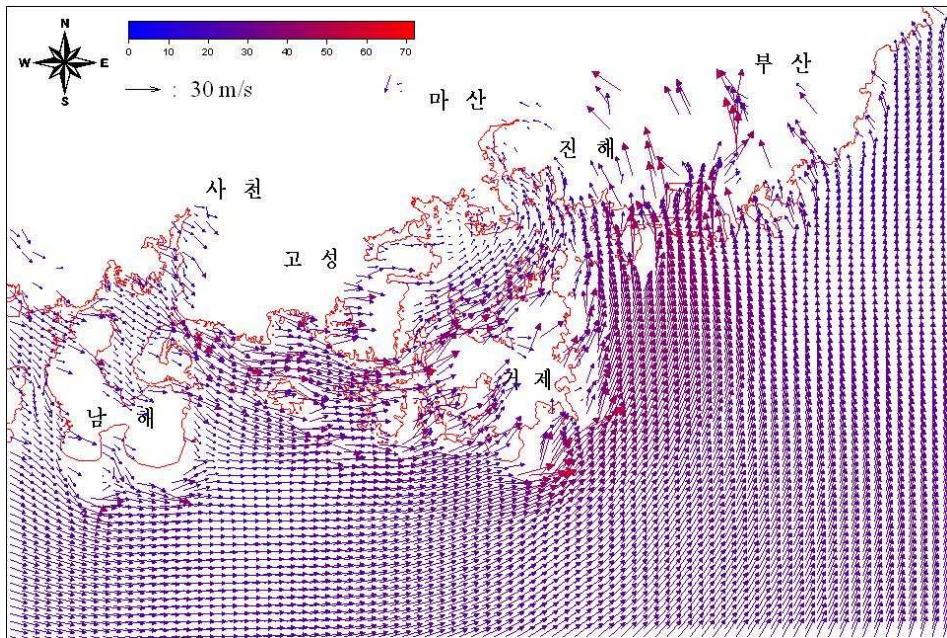


Fig. 3.18 Sea wind field calculated by MASCON model for typhoon Maemi.

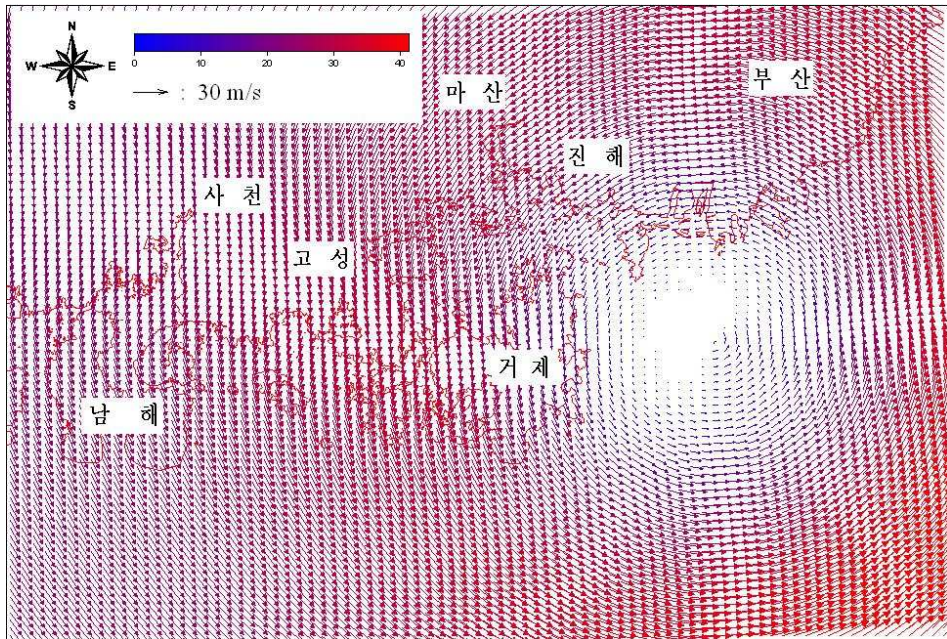


Fig. 3.19 Sea wind field calculated by Eq.(2.30) for typhoon Sarah.

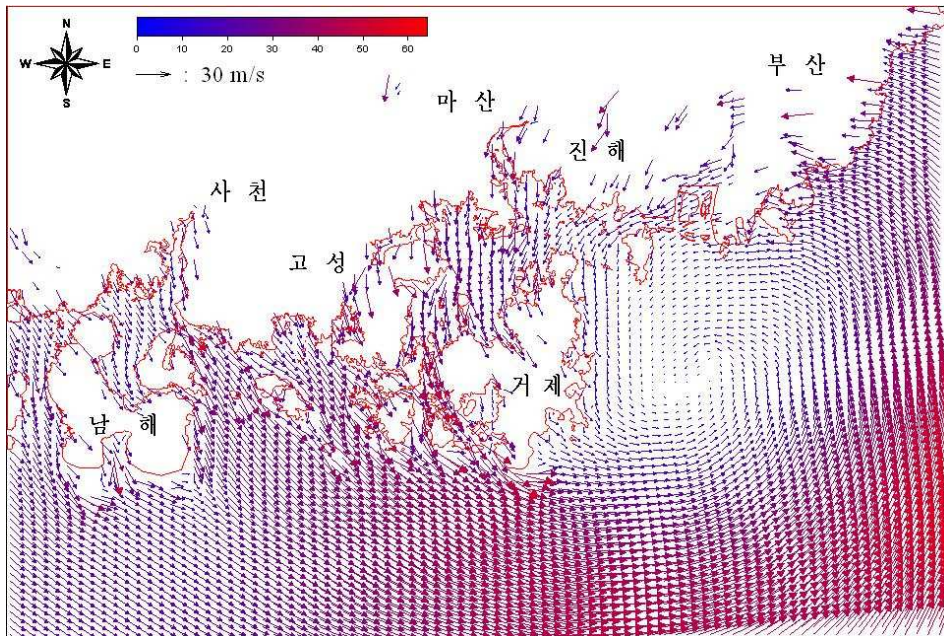


Fig. 3.20 Sea wind field calculated by MASCON model for typhoon Sarah.

3.3 SWAN모델에 의한 천해파랑

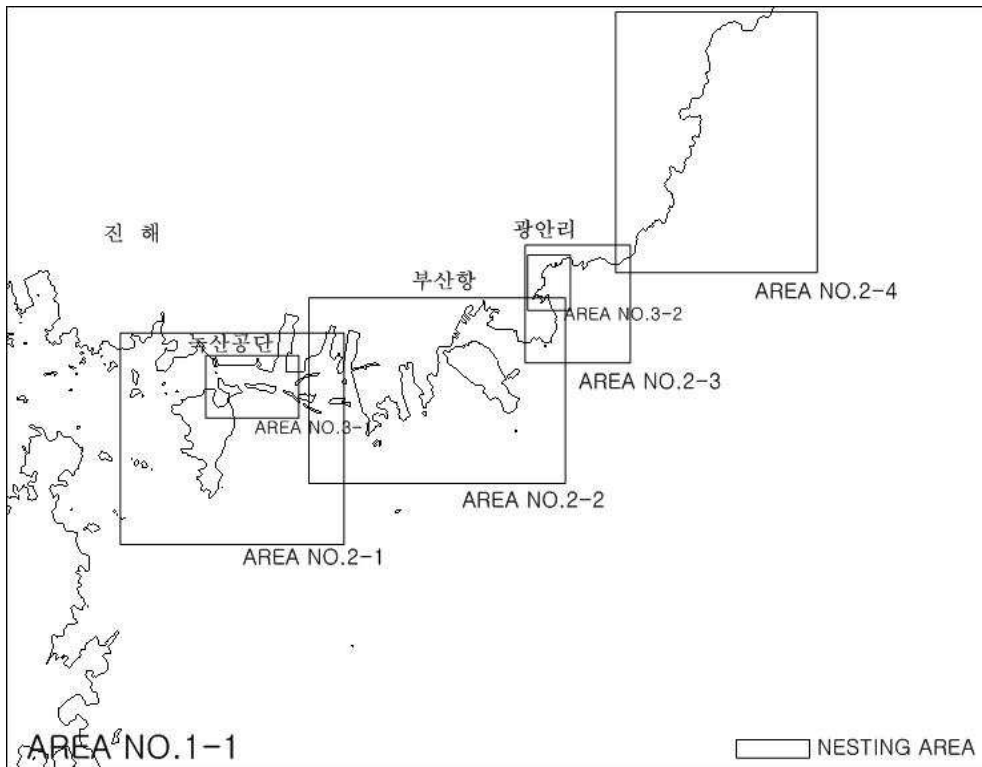
3.3.1 대상영역 및 조건

태풍 Maemi에 의해 많은 피해를 입었던 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지와 수영구 광안리 해역을 대상으로 천해파랑을 추산하였다. 전자와 후자는 차폐 및 개폐라는 지역적특성이 분명한 지역으로 지형의 영향이 고려된 바람장의 변화가 천해파랑특성에 미치는 영향의 유무를 비교·검토하기에 적절한 해역으로 판단된다.

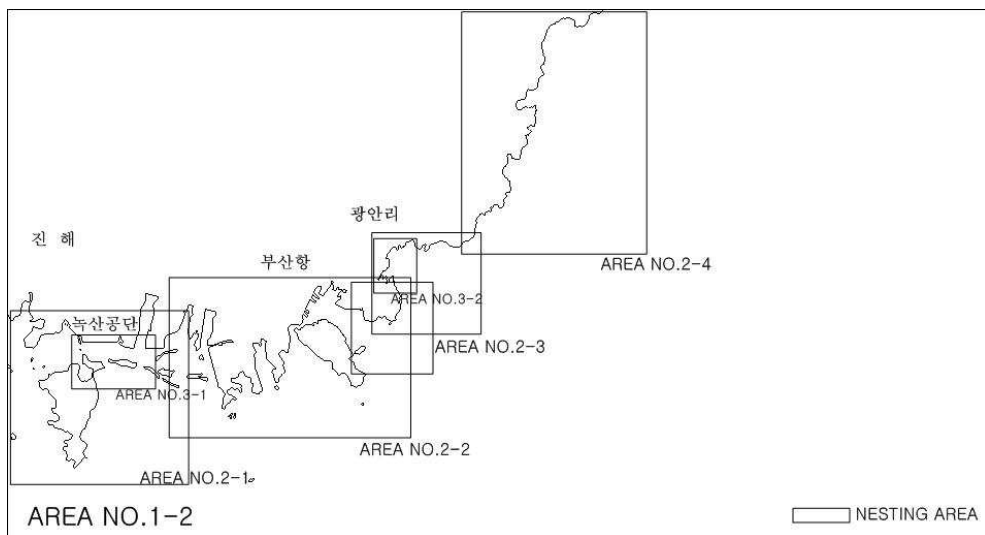
해당지역에 영향을 미칠 수 있는 모든 연안격자점의 신심해설계파를 고려하기 위해 광역은 200m, 중역은 50m, 협역은 20m의 격자크기로 설정하여 순차적으로 계산을 수행하였으며, 계산영역을 Fig. 3.21에, 격자구성에 대한 제반사항을 Table 3.6에 제시한다. 고려된 계산영역의 수심데이터와 해안선은 기본적으로 수치해도를 이용하였으며, 협역에서 충분하지 않은 수심데이터에 대해서는 실제 측량데이터를 추가하여 사용하였다. 각 영역의 수심에 대해서는 Fig. 3.22에 나타내었다. 그리고, 본 연구에서 고려된 태풍은 전절과 같이 태풍 Maemi, 태풍 Sarah의 경우이다. 태풍 Maemi에 대해서는 Fig. 3.17의 해상풍 바람장과 Fig. 3.18의 MASCON모델에 의해 지형의 영향이 고려된 해상풍을, 태풍 Sarah에 대해서는 Fig. 3.19의 해상풍 바람장과 Fig. 3.20의 MASCON모델에 의해 지형의 영향이 고려된 해상풍을 각각 계산영역에 일치하도록 계산에 필요한 바람장 데이터를 추출하였다. 계산에 사용된 신심해설계파 제원(한국해양연구원, 2005)을 Table 3.7에 나타내었다. 3.1절에서 추산한 폭풍해일고와 조위(해양수산부, 2000)를 Table 3.8에 나타내었으며, 해안선의 상태에 따라 적용한 반사율(Goda, 1985)의 값을 Table 3.9에 제시하였고, 반사율내 괄호()안의 값이 실제로 사용된 반사율이다.

Table 3.6 Mesh sizes applied to each simulating area.

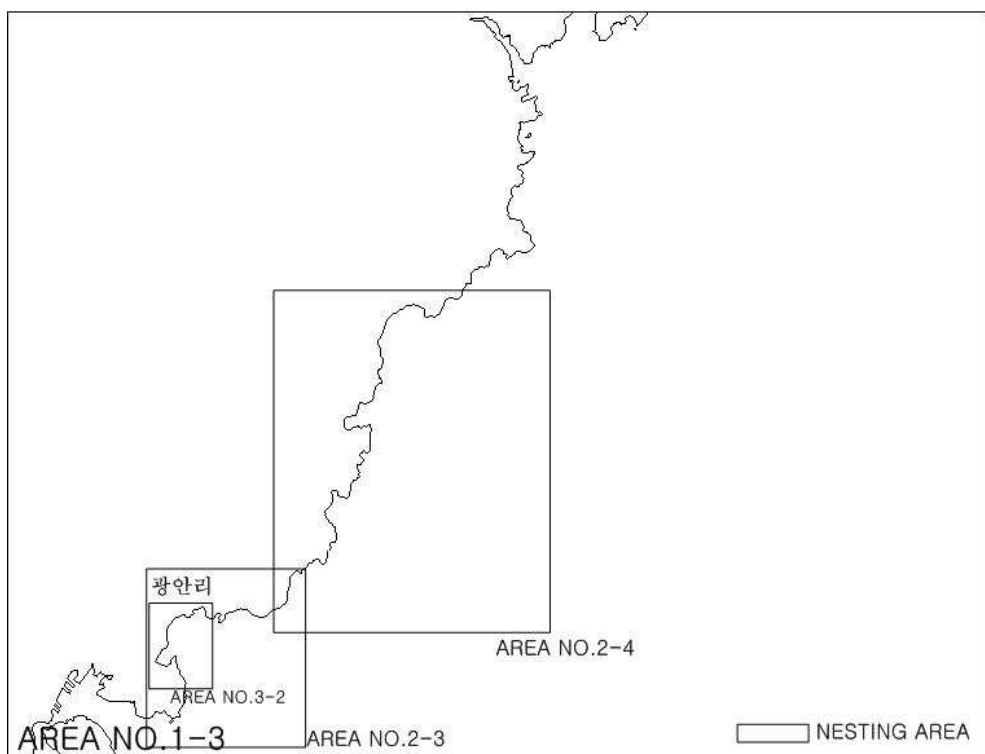
구 분	Mesh size(m)	Imesh×Jmesh	비 고<AREA>
AREA NO.1-1	200	385×300	Wide
AREA NO.1-2	200	410×220	Wide
AREA NO.1-3	200	300×228	Wide
AREA NO.2-1	50	314×260	Middle
AREA NO.2-2	50	420×290	Middle
AREA NO.2-3	50	200×216	Middle
AREA NO.2-4	80	325×275	Middle
AREA NO.3-1	20	320×185	Object
AREA NO.3-2	20	160×268	Object



(a) Wide area NO.1-1



(b) Wide area NO.1-2



(c) Wide area NO.1-3

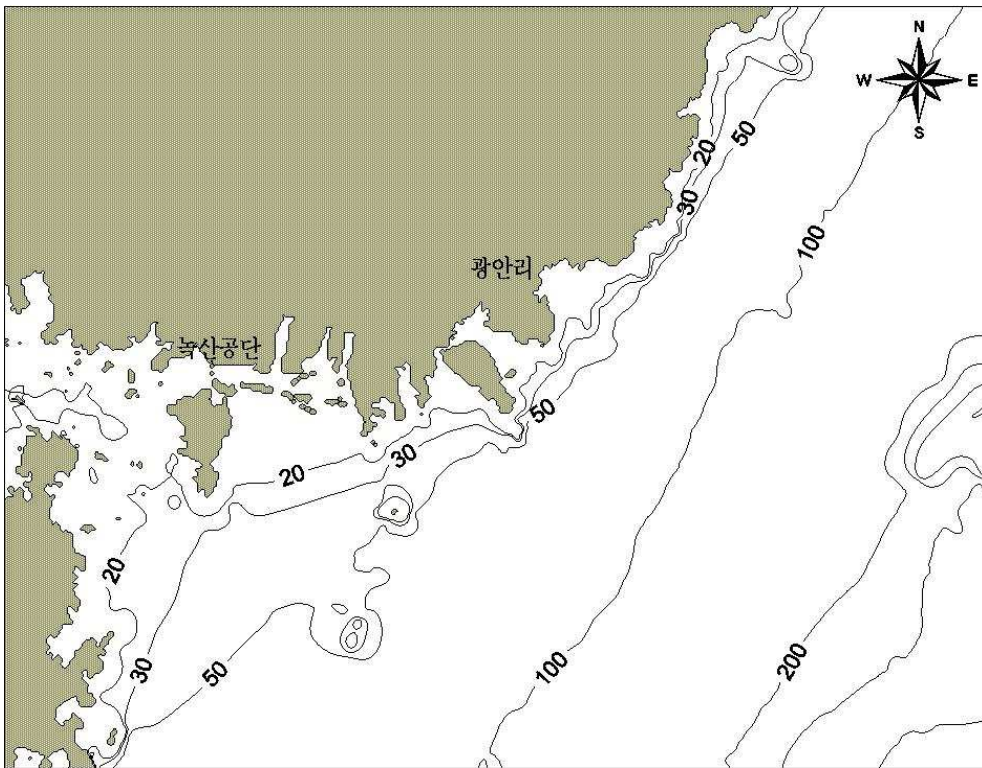
Fig. 3.21 Computation area of SWAN simulation.

Table 3.7 Water level for each simulating area.

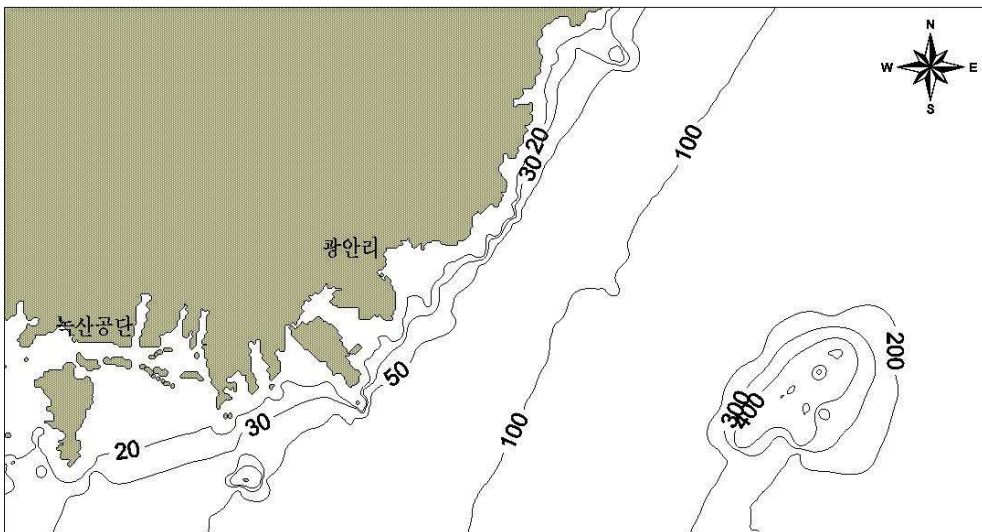
구 분	Approx. HHW (m)	Storm surge height (m)	Design level : Approx.HHW +Storm surge height(m)	비 고 <Nesting area>
AREA NO.1-1	1.906	1.69	3.596	NO.2-1
	1.476	1.35	2.826	NO.2-2
	1.137	1.12	2.257	NO.2-3
	1.009	0.77	1.779	NO.2-4
AREA NO.1-2	1.906	1.69	3.596	NO.2-1
	1.476	1.35	2.826	NO.2-2
	1.137	1.12	2.257	NO.2-3
	1.009	0.77	1.779	NO.2-4
AREA NO.1-3	1.137	1.12	2.257	NO.2-3
	1.009	0.77	1.779	NO.2-4
AREA NO.2-1	1.906	1.69	3.596	NO.3-1
AREA NO.2-3	1.137	1.12	2.257	NO.3-2
AREA NO.3-1	1.906	1.69	3.596	
AREA NO.3-2	1.137	1.12	2.257	

Table 3.8 Deepwater design wave for Busan coast.

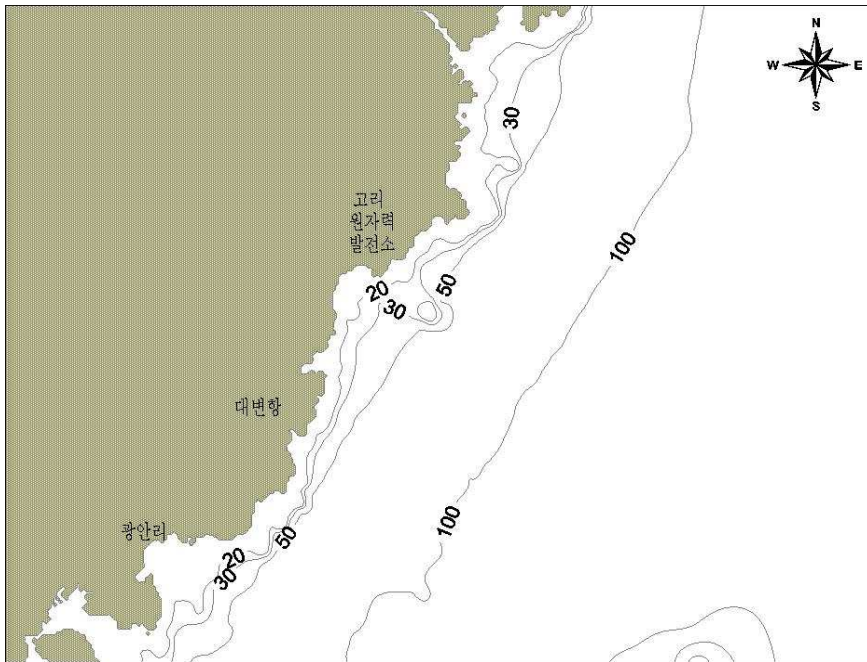
심해파랑 지점	Hs(m)	Ts(s)	파 향(dir.)	비 고
072125 (N34.80°, E128.83°)	12.02	14.69	SE	Case 1
	12.47	15.54	SSE	Case 2
	9.63	14.18	S	Case 3
	6.12	11.91	SSW	Case 4
	3.99	10.25	SW	Case 5
073125 (N34.80°, E129.00°)	11.91	14.49	SE	Case 6
	12.39	15.50	SSE	Case 7
	11.37	15.41	S	Case 8
	7.52	12.98	SSW	Case 9
074124 (N34.94°, E129.17°)	10.56	13.15	ESE	Case 10
	11.21	13.85	SE	Case 11
	12.25	15.16	SSE	Case 12
	9.91	14.33	S	Case 13
	7.02	12.72	SSW	Case 14
075124 (N34.94°, E129.33°)	9.86	12.49	ESE	Case 15
	10.37	12.83	SE	Case 16
	9.99	12.91	SSE	Case 17
	8.06	12.43	S	Case 18
076123 (N35.08°, E129.50°)	8.04	11.54	E	Case 19
	10.18	12.67	ESE	Case 20
	10.21	10.68	SE	Case 21
	10.76	13.30	SSE	Case 22
077122 (N35.21°, E129.67°)	6.60	10.83	ENE	Case 23
	7.73	11.25	E	Case 24
	10.10	12.63	ESE	Case 25
077121 (N35.35°, E129.67°)	6.61	11.67	ENE	Case 26
	7.94	11.45	E	Case 27
077120 (N35.49°, E129.67°)	6.79	11.83	NE	Case 28
	6.56	11.02	ENE	Case 29



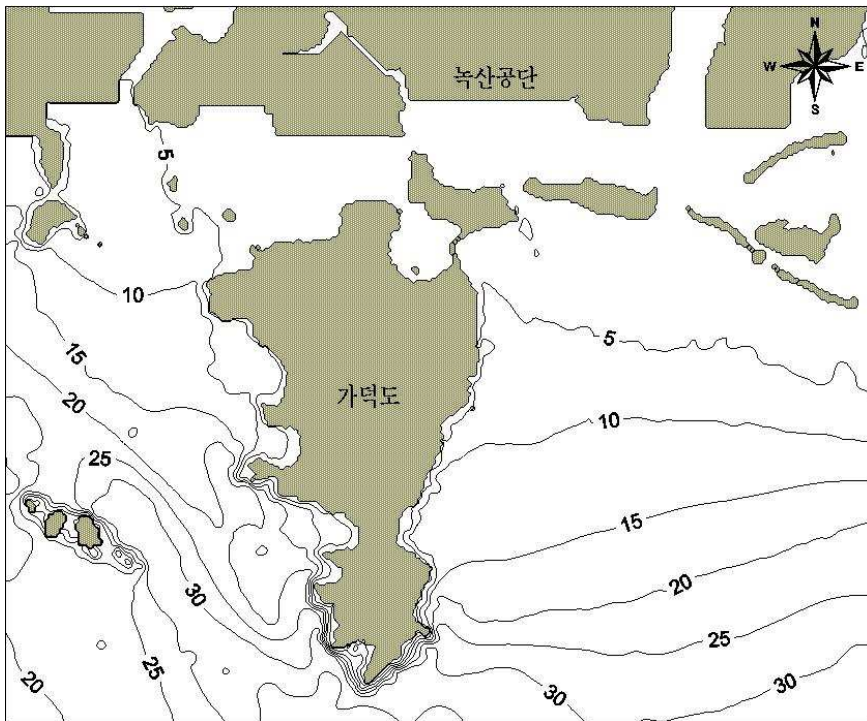
(a) Wide area NO.1-1



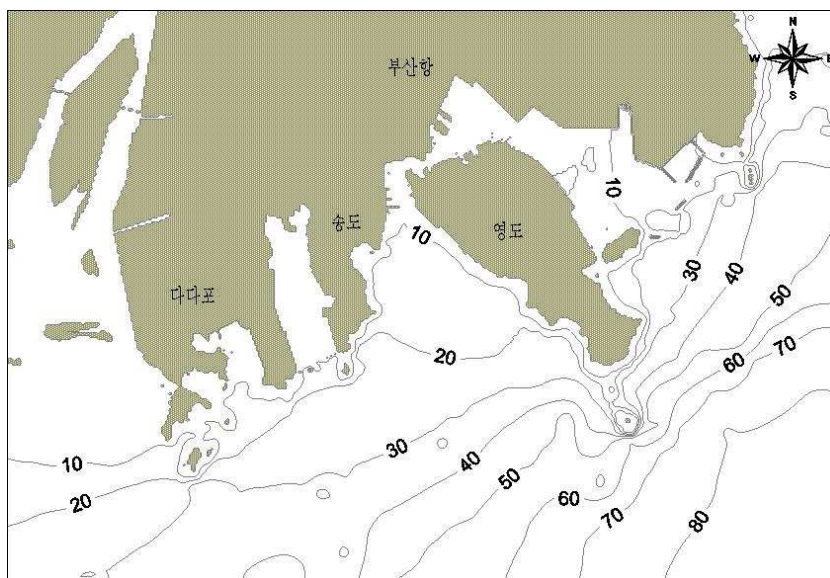
(b) Wide area NO.1-2



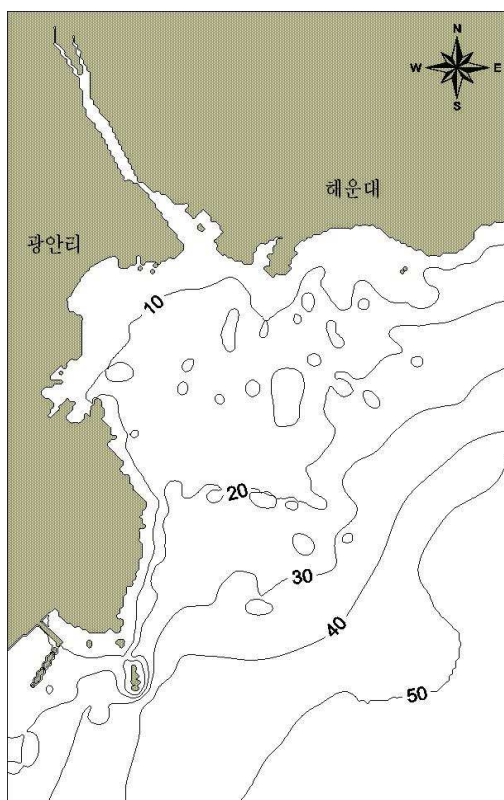
(c) Wide area NO.1-3



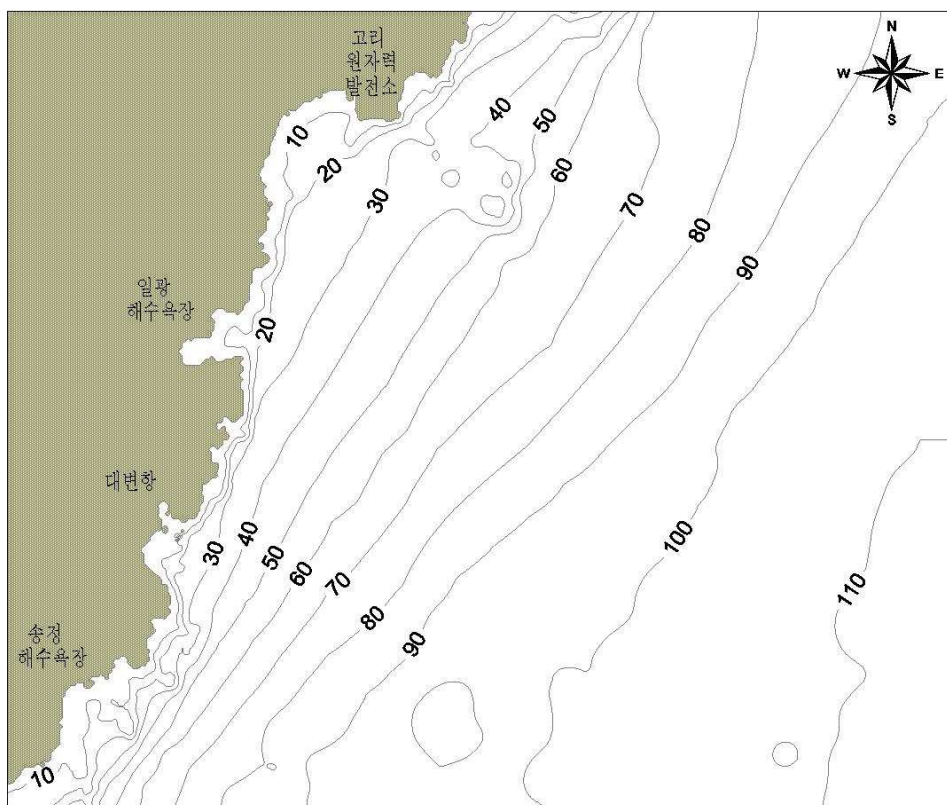
(d) Middle area NO.2-1



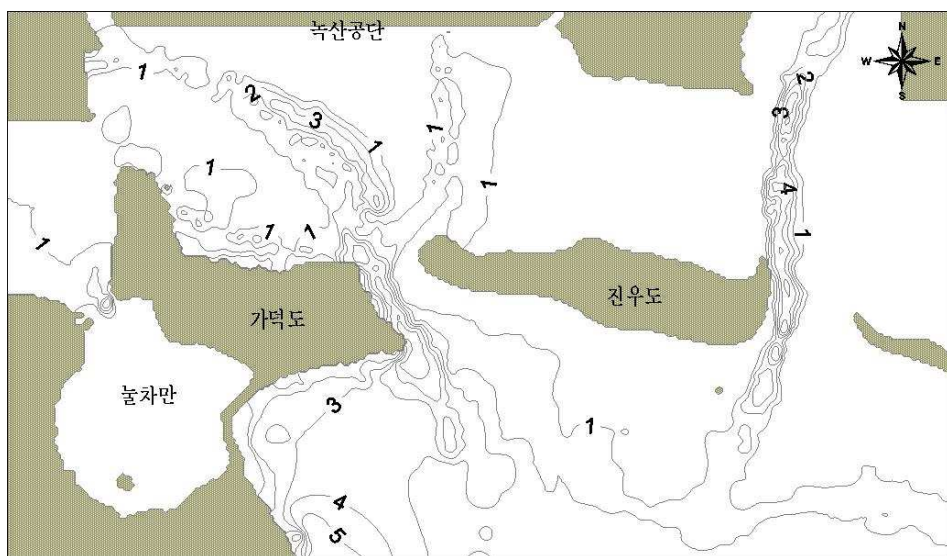
(e) Middle area NO.2-2



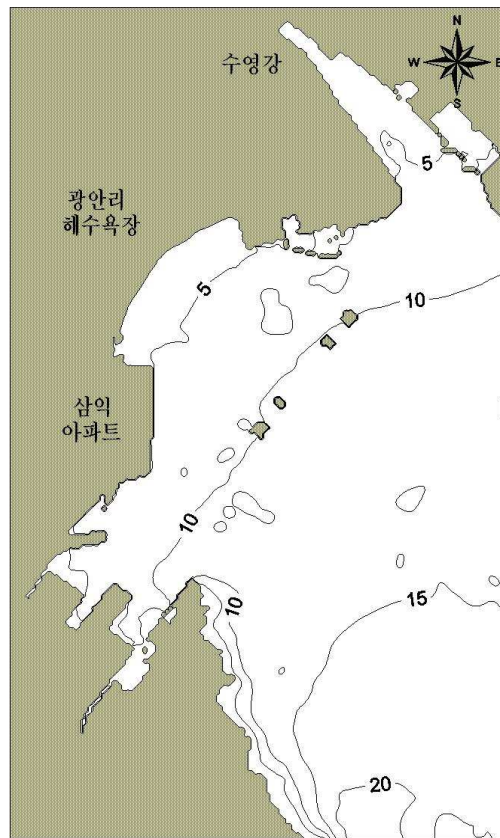
(f) Middle area NO.2-3



(g) Middle area NO.2-4



(h) Object area NO.3-1



(i) Object area NO.3-2

Fig. 3.22 Spatial distribution of water depth.

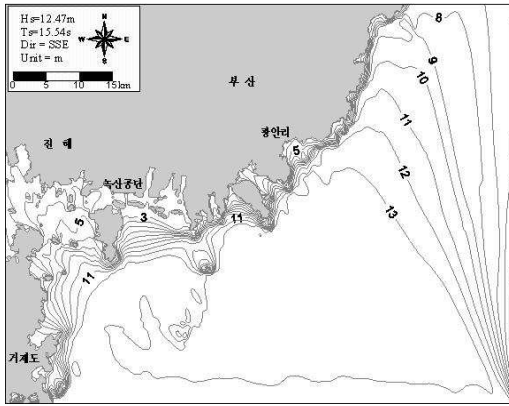
Table 3.9 Reflection coefficient.

구 분	반 사 율
자연해빈	0.05~0.2 (0.1)
이형콘크리트블록사면	0.2~0.4
사석사면	0.3~0.5 (0.4)
완경사벽면	0.4~0.8
직립벽, 급경사벽면	0.8~1.0 (0.9)
이형소파블록	0.3~0.5 (0.4)

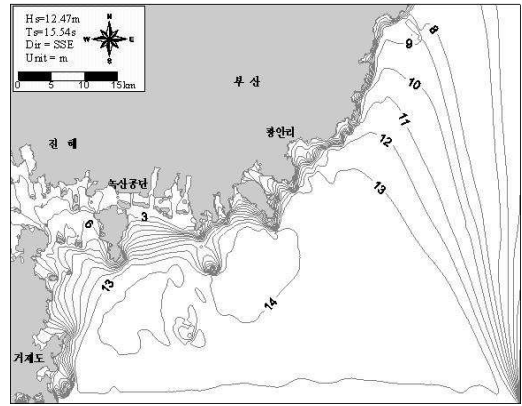
3.3.2 수치해석결과

(1) 녹산국가산업단지

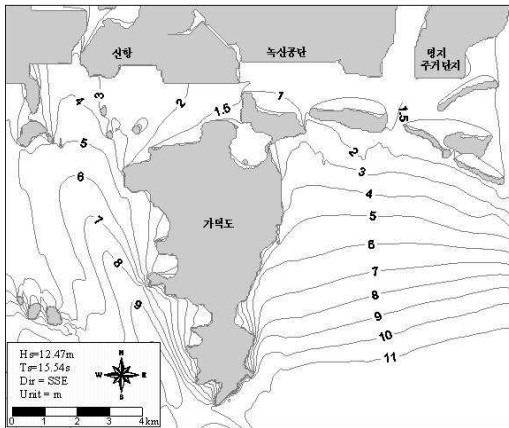
Fig. 3.23~Fig. 3.25는 Table 3.7과 3.8에 제시된 조건으로부터 태풍 Maemi시의 바람장을 이용하여 녹산국가산업단지(이하 ; 녹산공단) 전면에서 산정된 천해파랑의 일례(Table 3.8의 Case 2, Case 3, Case 7)를 나타낸 것이다. Fig. 3.23~Fig. 3.25에서 (a), (c), (e)의 파고분포도는 지형의 영향이 고려되지 않은 바람장을, (b), (d), (f)의 파고분포도는 MASCON모델에 의해 지형의 영향을 고려한 바람장을 각각 적용하여 SWAN모델에 의해 산정된 결과이다. 바람이 천해파랑산정에 미치는 영향을 알아보기 위한 것이므로 계산에 필요한 모든 조건들은 동일하게 설정하고 바람장만 차이를 고려한 후 모델을 실행하였다. 그림으로부터 녹산공단 전면에서의 파고분포는 Fig. 3.23~Fig. 3.25에서 (a), (c), (e)의 경우보다 (b), (d), (f)의 경우가 약간 크게 주어진다. 또한, 외해에 비해 상대적으로 차폐된 지역(가덕도-녹산공단-진우도)에서의 등파고선도는 Fig. 3.23~Fig. 3.25의 (a), (c), (e)에 비해 (b), (d), (f)의 경우가 복잡하게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 따라서, 보다 정도 높은 천해파랑을 산정하기 위하여 지형의 영향을 고려한 바람장이 계산에 적용될 필요가 있는 것으로 판단된다.



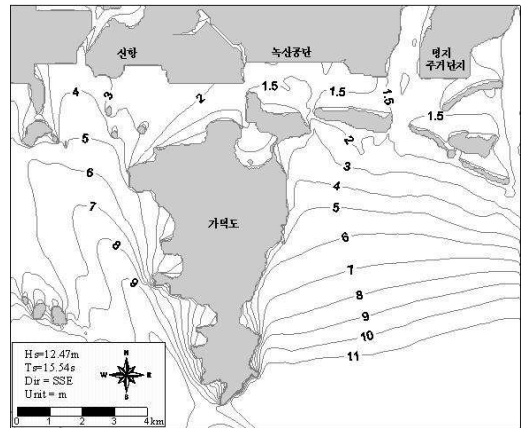
(a) Wide area NO.1-1 (Typhoon)



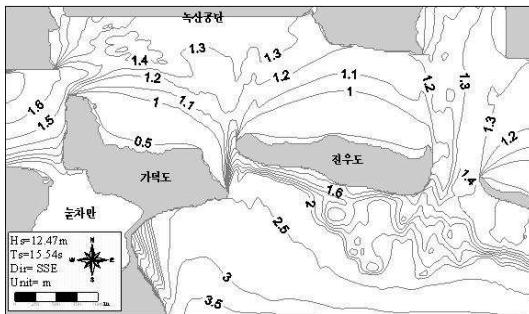
(b) Wide area NO.1-1 (MASCON)



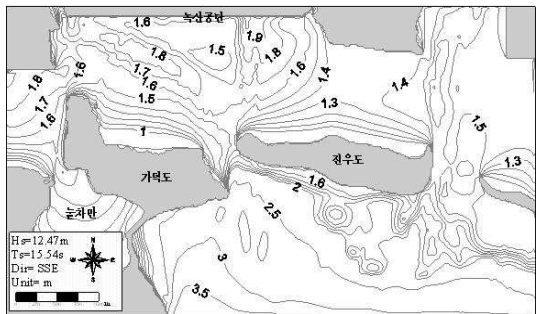
(c) Middle area NO.2-1 (Typhoon)



(d) Middle area NO.2-1 (MASCON)

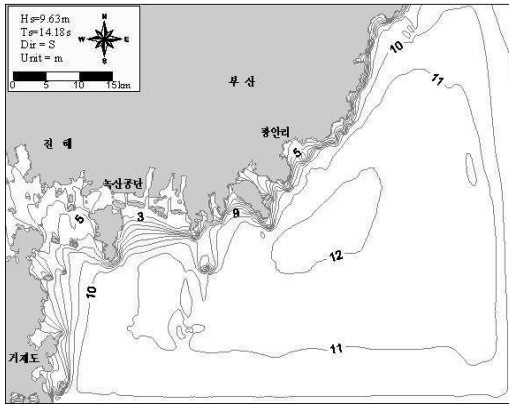


(e) Object area NO.3-1 (Typhoon)

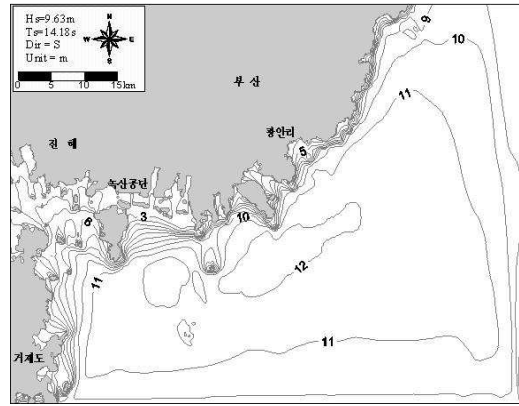


(f) Object area NO.3-1 (MASCON)

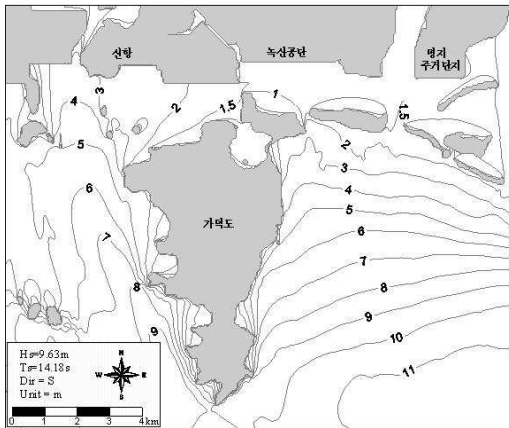
Fig. 3.23 Comparision of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Maemi around Noksan (case 2).



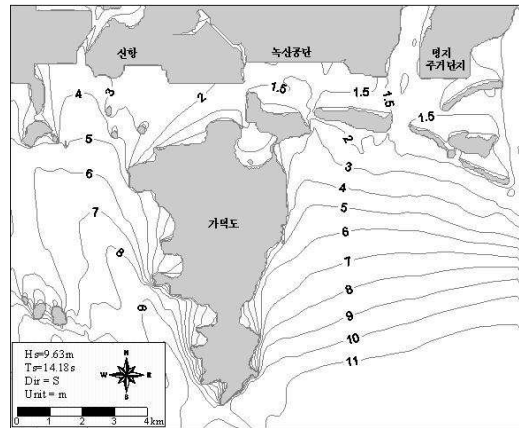
(a) Wide area NO.1-1 (Typhoon)



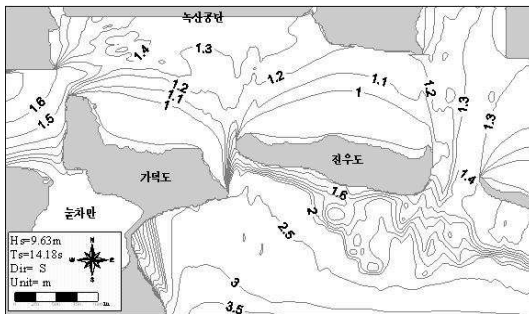
(b) Wide area NO.1-1 (MASCON)



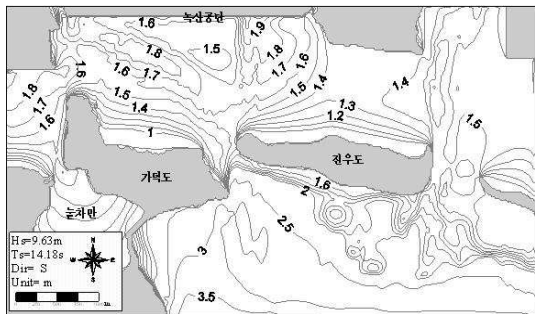
(c) Middle area NO.2-1 (Typhoon)



(d) Middle area NO.2-1 (MASCON)

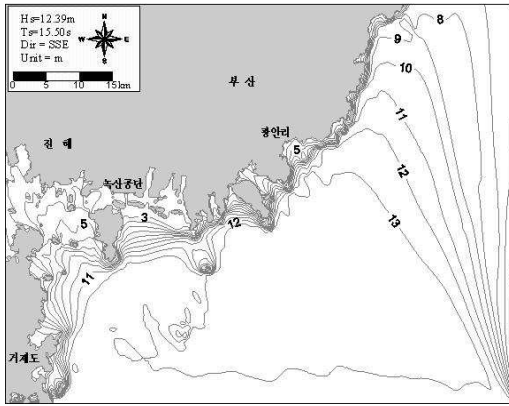


(e) Object area NO.3-1 (Typhoon)

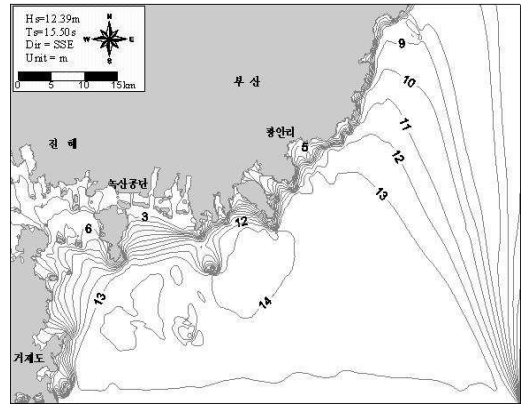


(f) Object area NO.3-1 (MASCON)

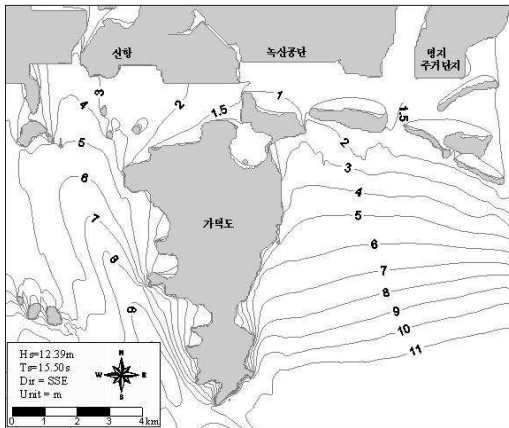
Fig. 3.24 Comparison of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Maemi around Noksan (case 3).



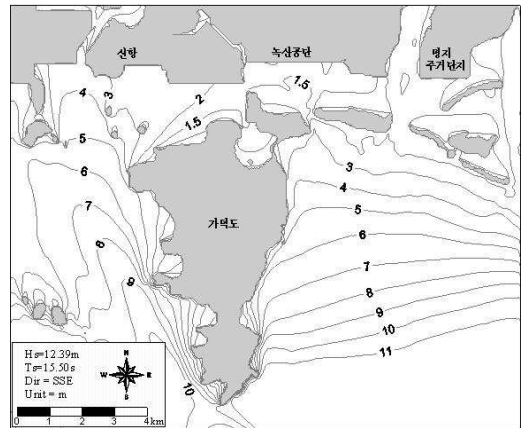
(a) Wide area NO.1-1 (Typhoon)



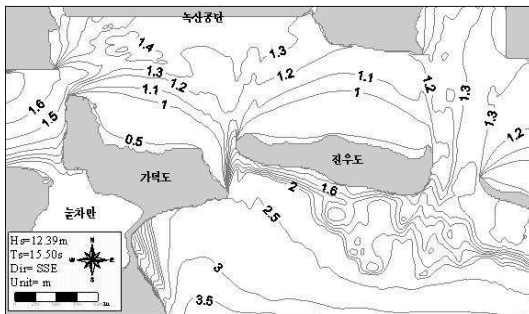
(b) Wide area NO.1-1 (MASCON)



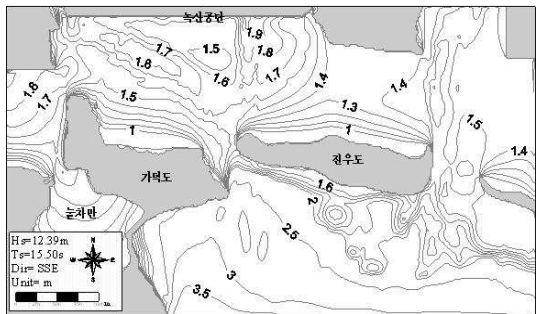
(c) Middle area NO.2-1 (Typhoon)



(d) Middle area NO.2-1 (MASCON)



(e) Object area NO.3-1 (Typhoon)



(f) Object area NO.3-1 (MASCON)

Fig. 3.25 Comparision of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Maemi around Noksan (case 7).

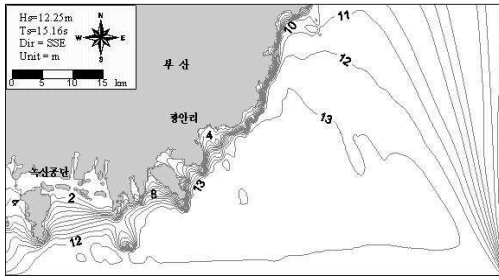
(2) 광안리 인근해역

Fig. 3.26~Fig. 3.30은 Table 3.7과 3.8에 제시된 조건으로부터 최대폭풍해일고를 나타낸 태풍 Sarah의 바람장을 이용하여 광안리 전면에서 산정된 천해파랑의 일례(Case 12, Case 13, Case 16, Case 17, Case 19)를 나타낸 것이다. Fig. 3.26~Fig. 3.30의 (a), (c), (e)는 지형의 영향이 고려되지 않은 바람장을, (b), (d), (f)은 MASCON모델에 의해 지형의 영향을 고려한 바람장을 이용하여 얻어진 결과이다. 바람이 천해파랑산정에 미치는 영향을 알아보기 위한 것이므로 계산에 필요한 모든 조건들은 동일하게 설정하고 바람장만 차이를 고려한 후 모델을 실행하였다. 광안리 지역의 경우는 녹산공단의 경우와 비교하여 상대적으로 개폐된 해역이기 때문에 바람장의 변화가 크지 않으며, 따라서 파고의 변화도 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

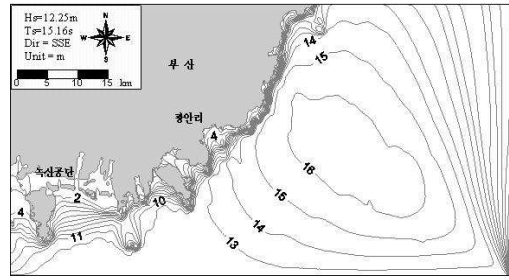
(3) 삼익아파트 전면에서의 파고 및 주기 산정

삼익아파트 전면해역에 대해서 산정한 유의파고를 Fig. 3.31에 나타내며, Fig. 3.32는 평균주기로 얻어지는 값을 유의주기로 환산한 값이다(Goda, 1985). 이 때, 본 계산에서는 삼익아파트 전면해역에 발생될 수 있는 반사파의 중복을 방지하기 위하여 삼익아파트 전면호안에 설치된 TTP의 반사에 의한 영향을 고려하지 않는 것으로 하였다.

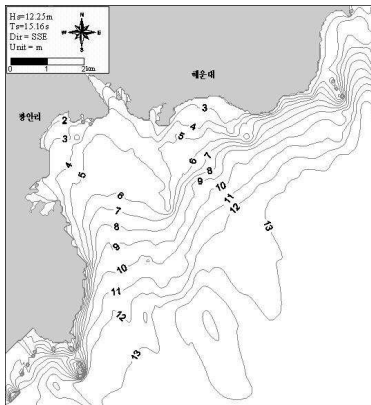
Fig. 3.31과 Fig. 3.32의 결과값을 비교하면 고려된 다섯 개의 신심해설계파제원 중에서 Case 12($H_s=12.25m$, $T_s=15.16sec$, $Dir=SSE$)는 삼익아파트 전면호안에서 353~357cm의 파고분포와 13.25~13.70sec의 주기분포를 가지며, Case 13($H_s=9.91m$, $T_s=14.33sec$, $Dir=S$)은 328~354cm의 파고분포와 11.57~12.09sec의 주기분포를 가지는 것을 확인할 수 있다. Case 16($H_s=10.37m$, $T_s=12.83sec$, $Dir=SE$)은 356~390cm의 파고분포와 12.23~12.79sec의 주기분포, Case 17($H_s=9.99m$, $T_s=12.91sec$, $Dir=SSE$)은 349~372cm의 파고분포와 12.12~12.53sec의 주기분포, Case 19($H_s=8.04m$, $T_s=11.54sec$, $Dir=E$)는 355~403cm의 파고분포와 11.04~11.63sec의 주기분포를 각각 나타내고 있다.



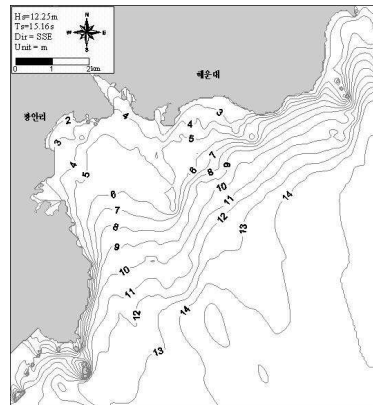
(a) Wide area NO.1 (Typhoon)



(b) Wide area NO.1 (MASCON)



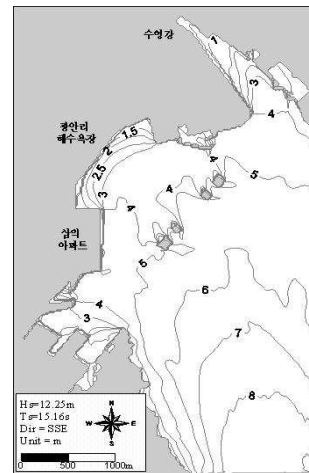
(c) Middle area NO.2-3 (Typhoon)



(d) Middle area NO.2-3 (MASCON)

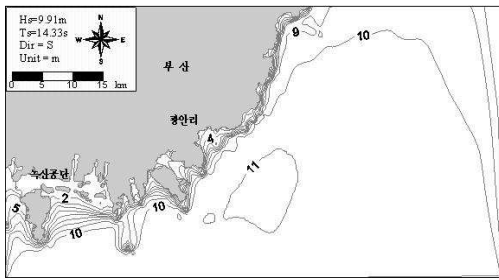


(e) Object area NO.3-2 (Typhoon)

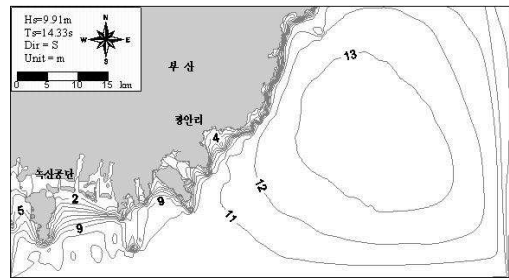


(f) Object area NO.3-2 (MASCON)

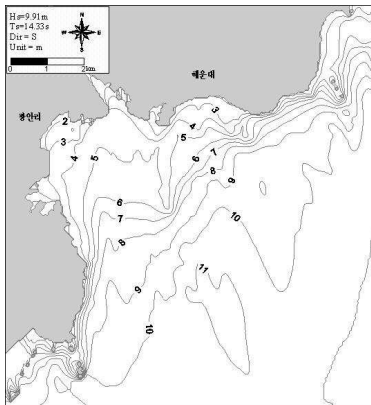
Fig. 3.26 Comparision of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Sarah around Gwangsanri (case 12).



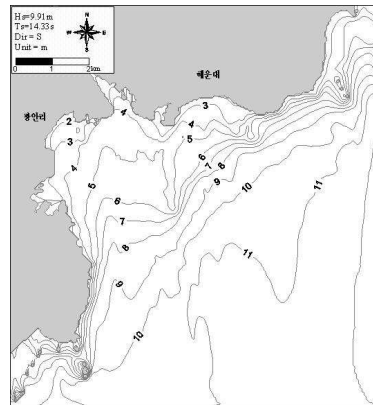
(a) Wide area NO.1 (Typhoon)



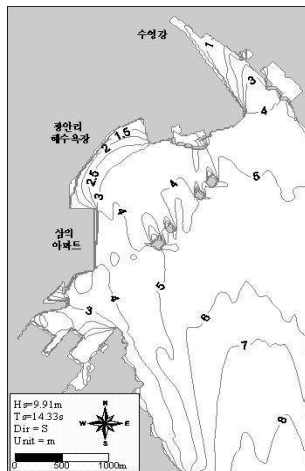
(b) Wide area NO.1 (MASCON)



(c) Middle area NO.2-3 (Typhoon)



(d) Middle area NO.2-3 (MASCON)

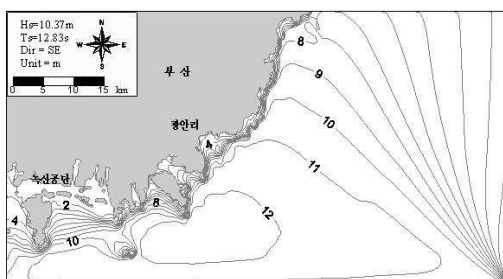


(e) Object area NO.3-2 (Typhoon)

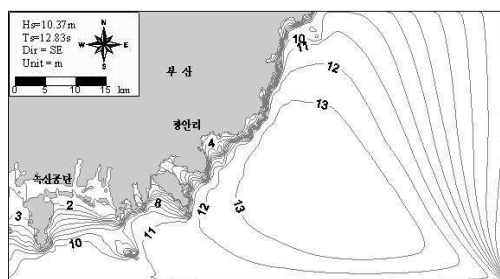


(f) Object area NO.3-2 (MASCON)

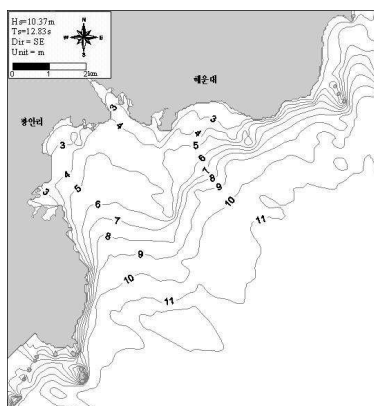
Fig. 3.27 Comparison of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Sarah around Gwangsanri (case 13).



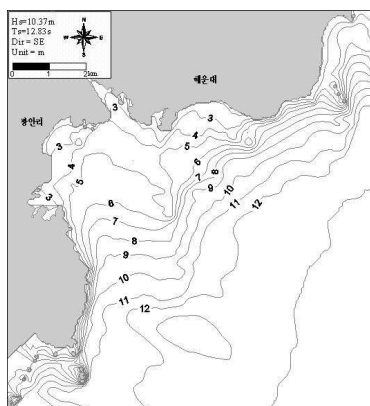
(a) Wide area NO.1 (Typhoon)



(b) Wide area NO.1 (MASCON)



(c) Middle area NO.2-3 (Typhoon)



(d) Middle area NO.2-3 (MASCON)

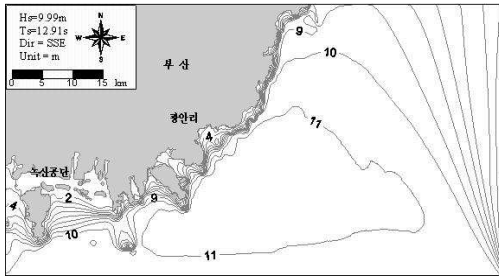


(e) Object area NO.3-2 (Typhoon)

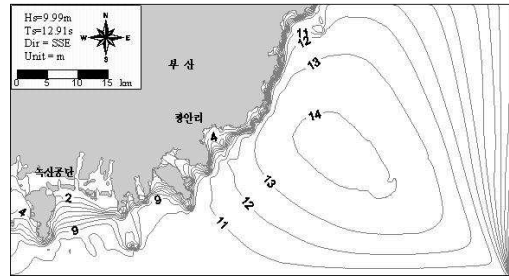


(f) Object area NO.3-2 (MASCON)

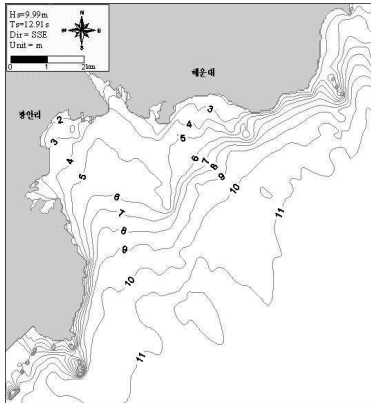
Fig. 3.28 Comparison of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Sarah around Gwanganri (case 16).



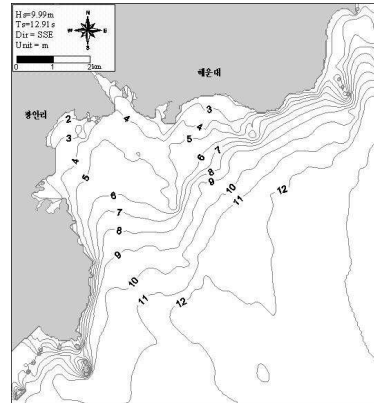
(a) Wide area NO.1 (Typhoon)



(b) Wide area NO.1 (MASCON)



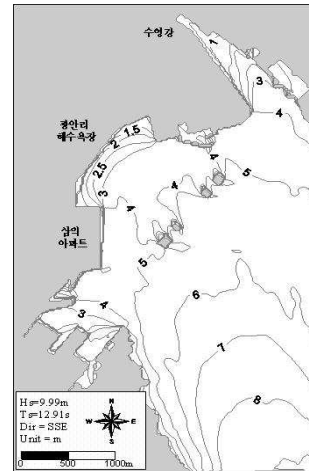
(c) Middle area NO.2-3 (Typhoon)



(d) Middle area NO.2-3 (MASCON)

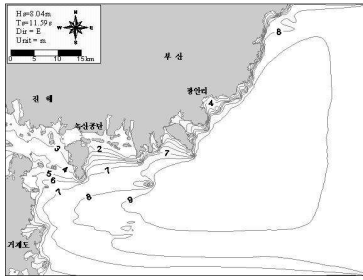


(e) Object area NO.3-2 (Typhoon)

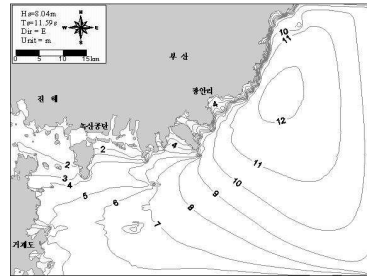


(f) Object area NO.3-2 (MASCON)

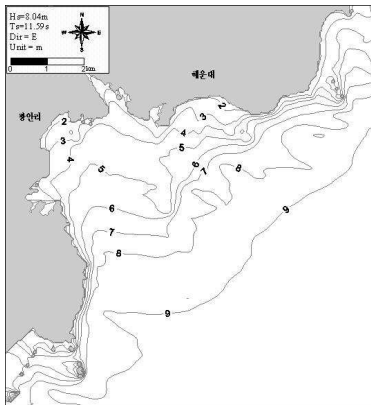
Fig. 3.29 Comparison of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Sarah around Gwangsanri (case 17).



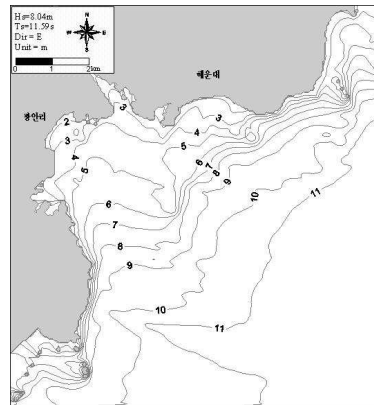
(a) Wide area NO.1 (Typhoon)



(b) Wide area NO.1 (MASCON)



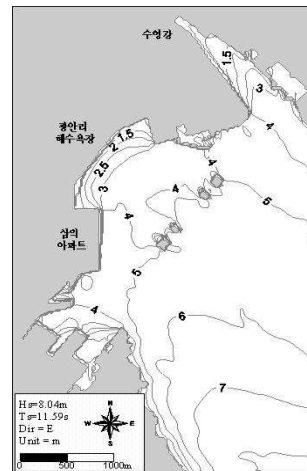
(c) Middle area NO.2-3 (Typhoon)



(d) Middle area NO.2-3 (MASCON)

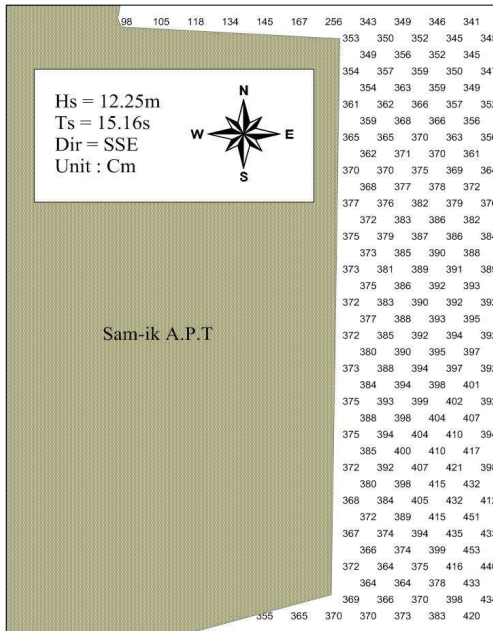


(e) Object area NO.3-2 (Typhoon)

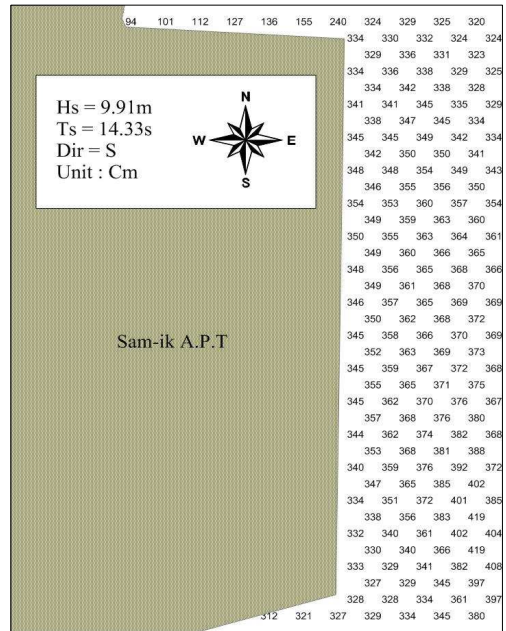


(f) Object area NO.3-2 (MASCON)

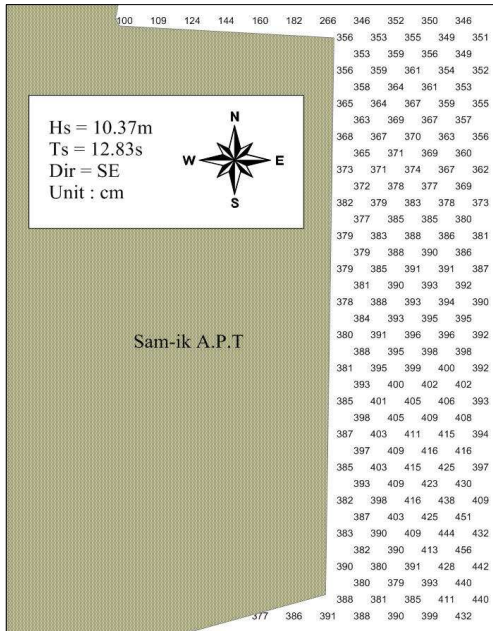
Fig. 3.30 Comparison of wave height distribution between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Sarah around Gwangsanri (case 19).



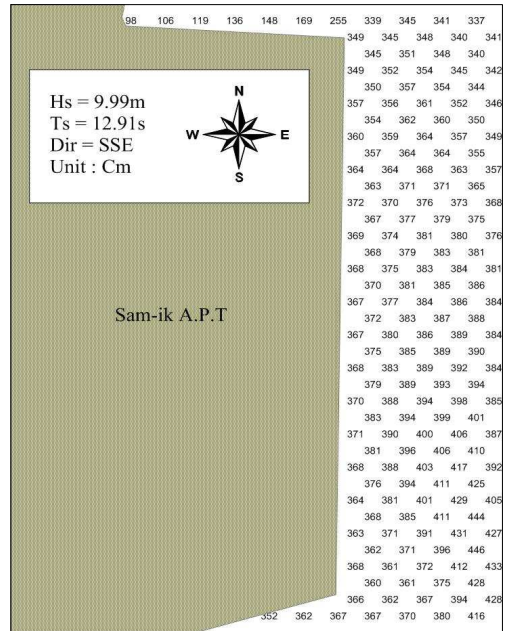
(a) case 12



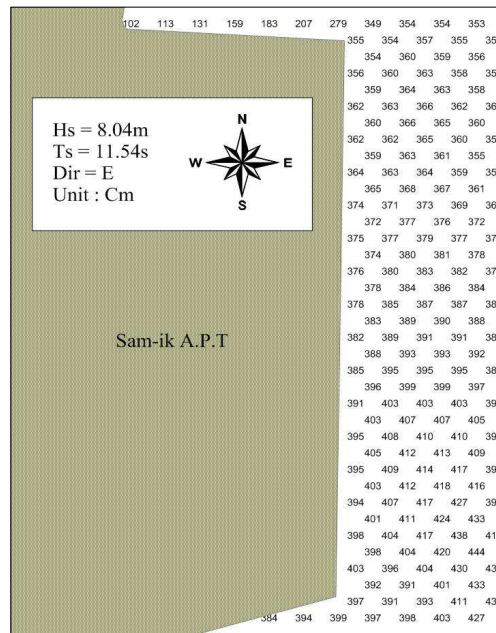
(b) case 13



(c) case 16

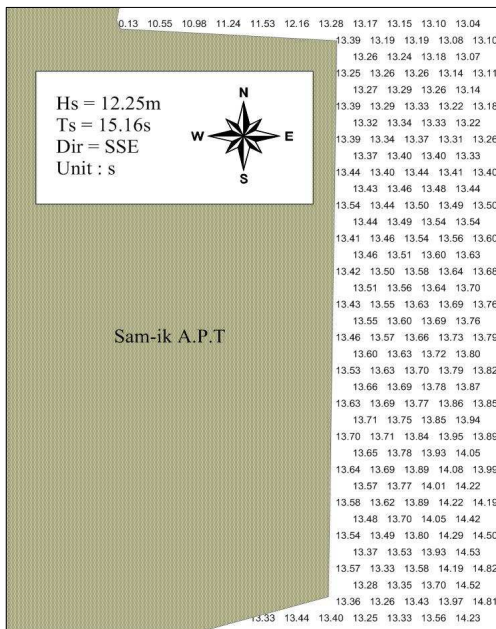


(d) case 17

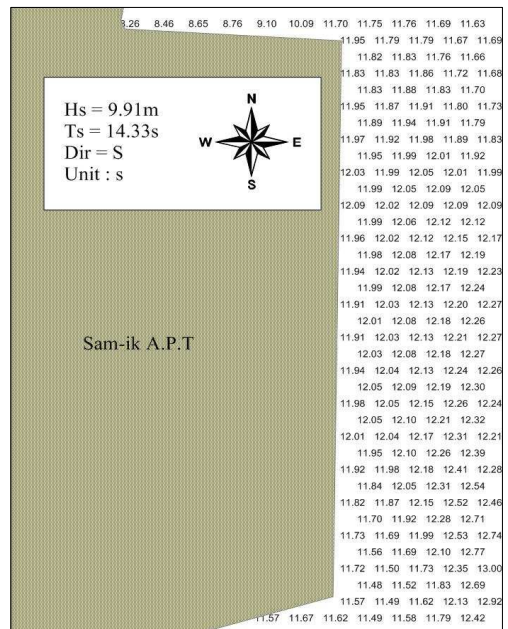


(e) case 19

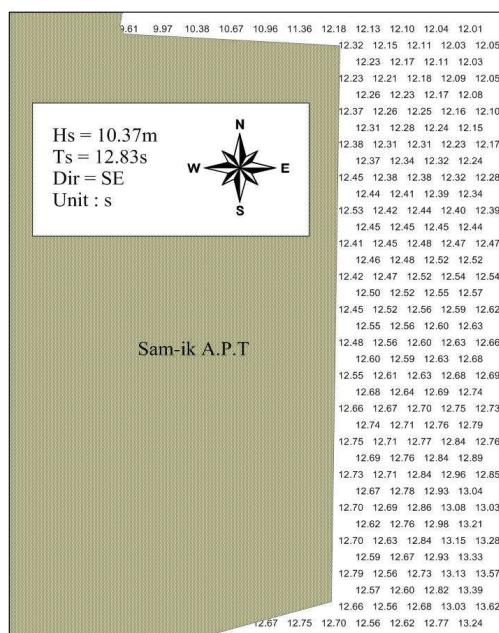
Fig. 3.31 Spatial distribution of significant wave height around front seawall of Samik APT.



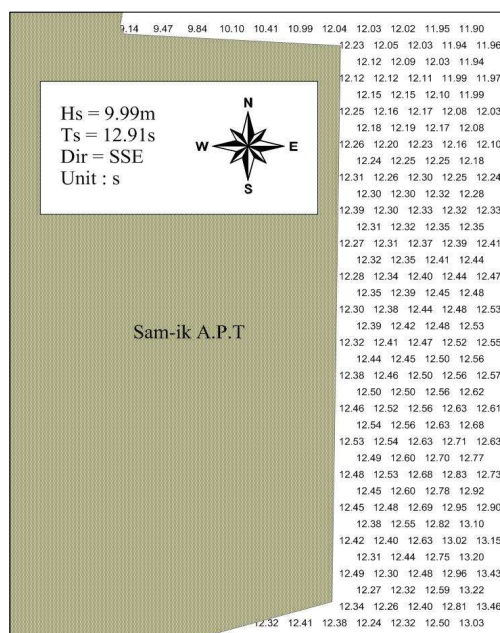
(a) case 12



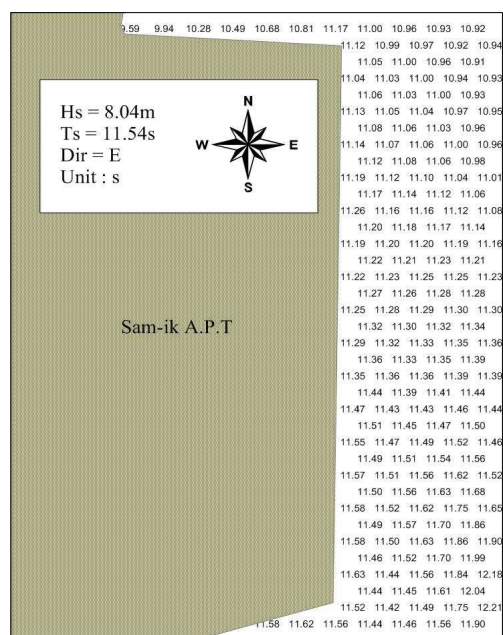
(b) case 13



(c) case 16



(d) case 17



(e) case 19

Fig. 3.32 Spatial distribution of significant wave period around front seawall of Samik APT.

3.3.3 천해파랑의 비교

최근에 강도가 큰 태풍이 빈번하게 내습하는 등 이상기후의 영향을 고려한 신심해설 계파가 추정(한국해양연구원, 2005)되었다. 이로인해 부산연안의 설계파의 변화가 발생하게 되는데, 본 절에서는 심해설계파의 변화에 따른 천해설계파랑의 추이를 알아보고자 한다. 따라서, 부산 연안에 대해서 기존의 심해설계파(이하 ; 구심해설계파)와 신심해설계파에 의한 천해설계파랑을 추정하여 비교 및 분석한다.

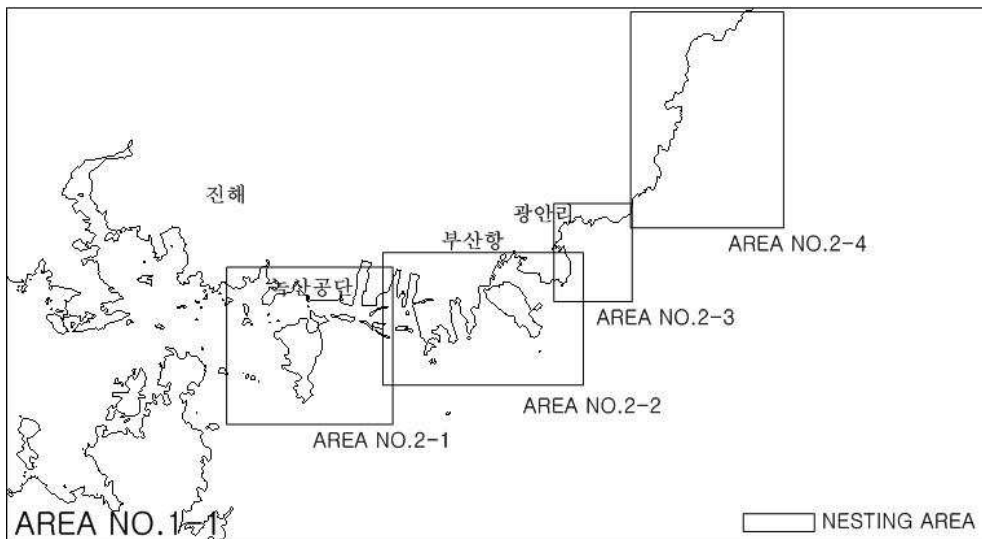
(1) 구심해설계파랑 조건에 의한 천해파랑

계산영역은 부산광역시 전연안(강서구~기장군)으로 선정하였으며, 전 연안에 영향을 미칠 수 있는 구심해설계파를 모두 고려하기 위해 광역은 200m, 중역 50m로 설정하여 순차적으로 계산을 수행하였다. 격자구성에 대한 제반사항을 Table 3.10에 나타내며, 그 영역을 Fig. 3.33에 제시한다. 계산영역의 수심과 해안선은 수치해도를 이용하여 추출하였다. 광역의 수심은 Fig. 3.34에 나타내고, 중역의 수심은 Fig. 3.22의 (d), (e), (f), (g)를 사용한다. 계산에 필요한 바람장 데이터는 3.2절에서 산정한 결과를 사용하였다. 태풍 Maemi에 관해서는 Fig. 3.17의 해상풍 바람장과 태풍 Sarah에 관해서는 Fig. 3.19의 해상풍 바람장을 각 계산영역에 일치하도록 추출하였다. 계산에 사용된 구심해설계파 제원(수산청, 1988; 해운항만청, 1988)을 Table 3.11에 나타내었다. 3.1절에서 추산한 폭풍해일고와 조위(해양수산부, 2000)를 Table 3.12에 나타내었다.

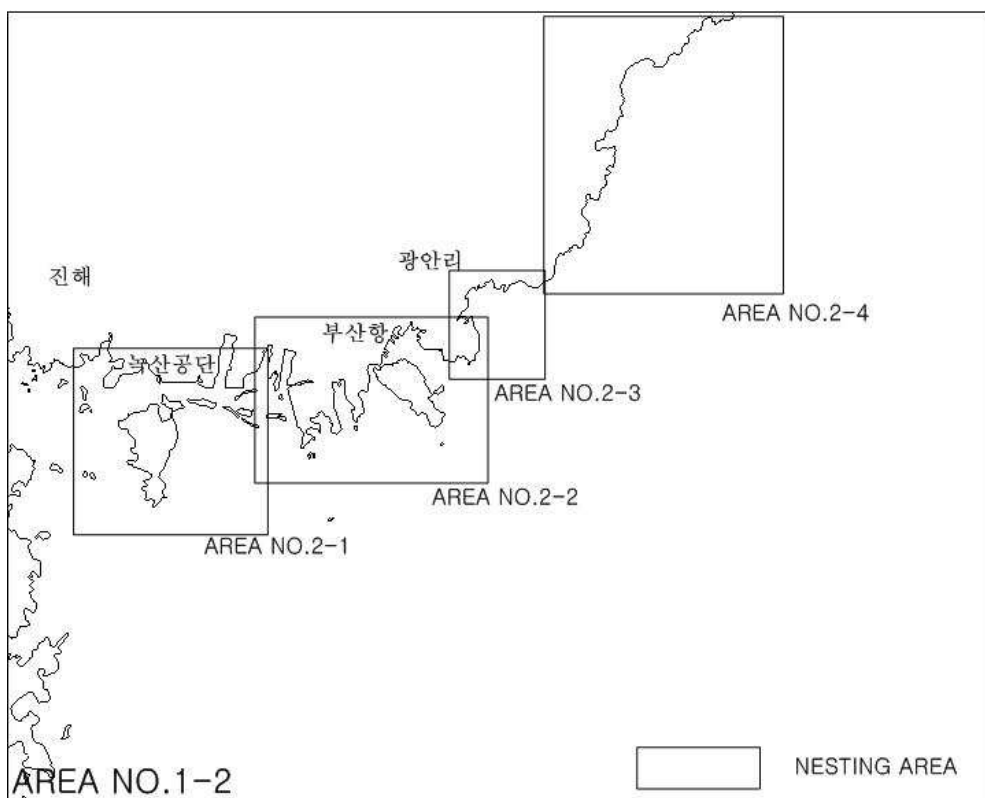
Table 3.11에 주어진 모든 심해파랑조건으로 계산을 수행한 일례(각 중역별 최대파고)를 Fig. 3.35~Fig. 3.38에 나타낸다.

Table 3.10 Mesh sizes applied to each simulating area.

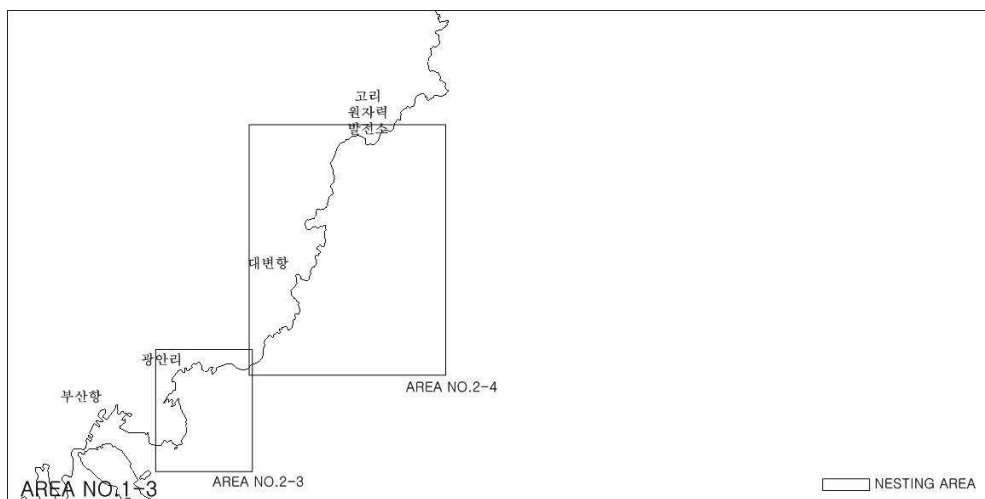
구 분	MESH SIZE(m)	IMESH×JMESH	비 고 <AREA>
AREA NO.1-1	200	500×270	Wide
AREA NO.1-2	200	410×330	Wide
AREA NO.1-3	200	400×200	Wide
AREA NO.2-1	50	314×260	Middle
AREA NO.2-2	50	420×290	Middle
AREA NO.2-3	50	200×216	Middle
AREA NO.2-4	80	325×275	Middle



(a) Wide area NO.1-1

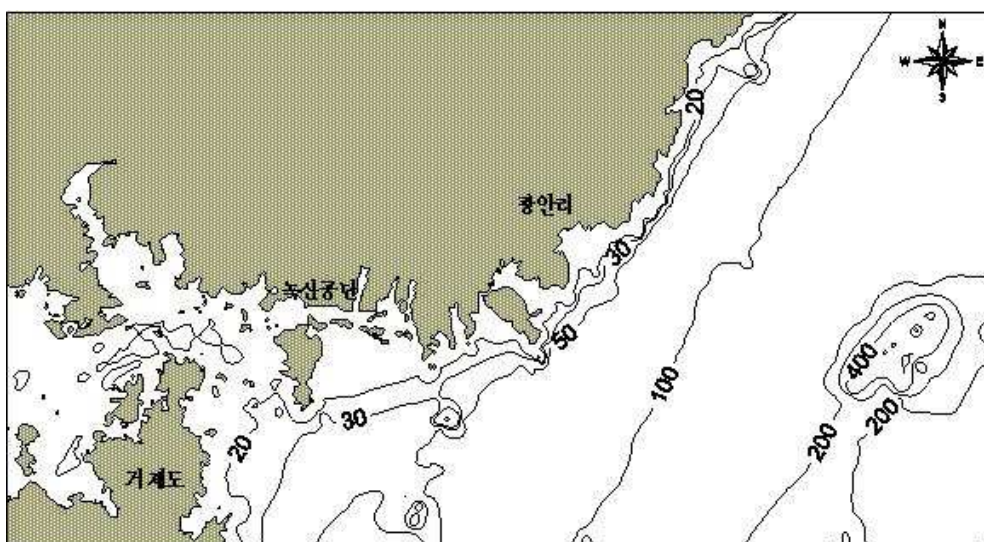


(b) Wide area NO.1-2

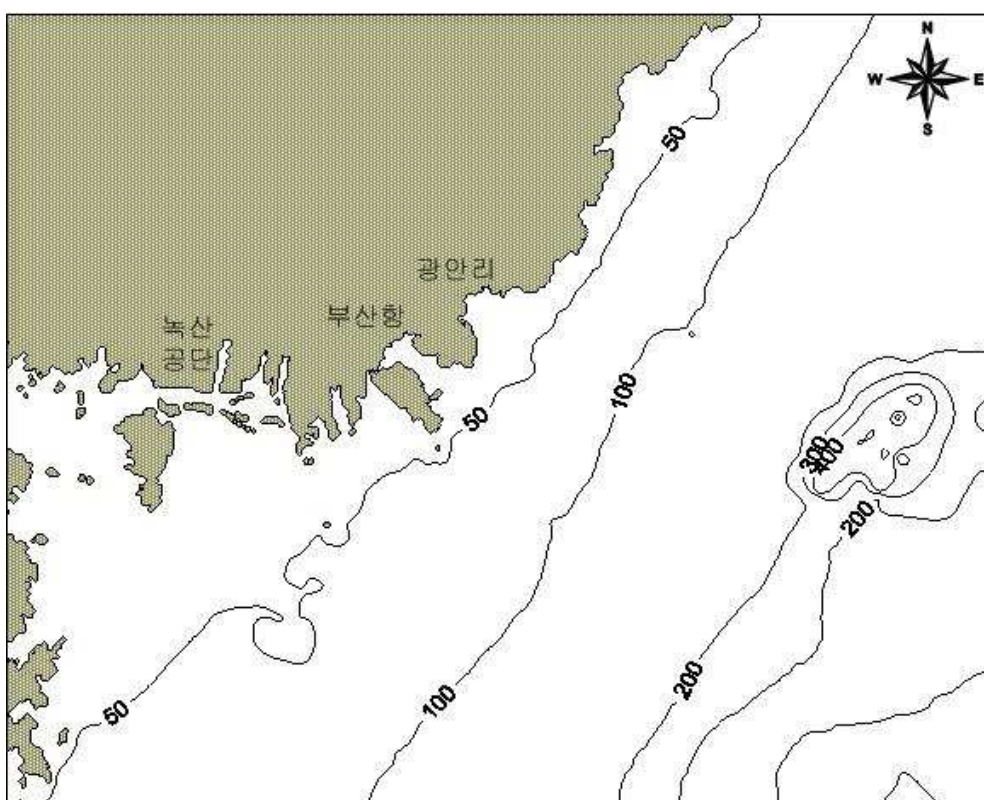


(c) Wide area NO.1-3

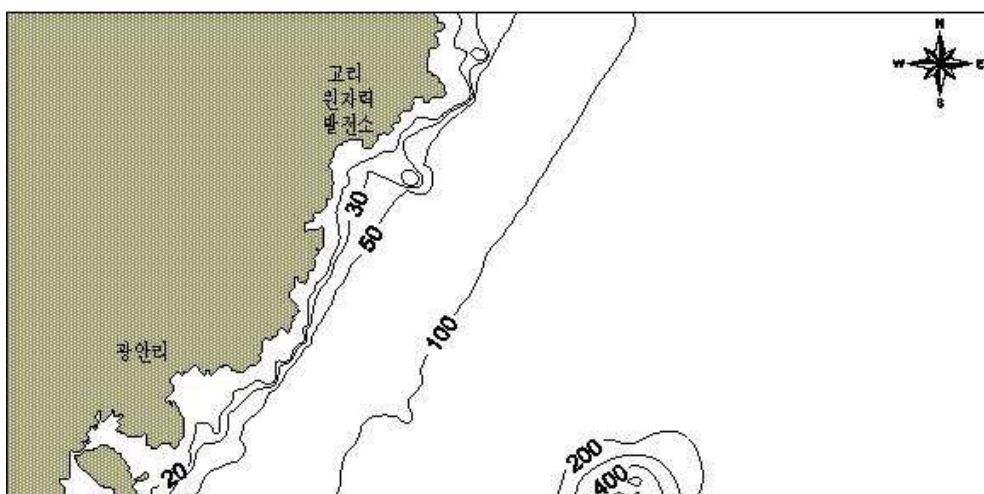
Fig. 3.33 Computation area for SWAN simulation.



(a) Wide area NO.1-1



(b) Wide area NO.1-2



(c) Wide area NO.1-3

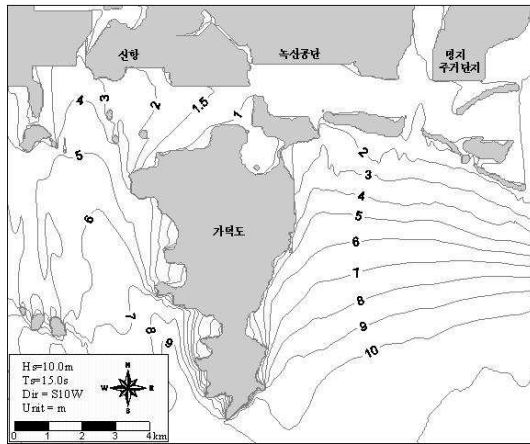
Fig. 3.34 Spatial distribution of water depth.

Table 3.11 Water level for each simulating area.

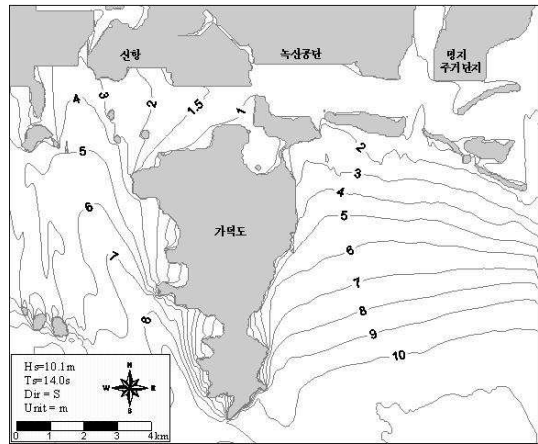
구 분	Approx. HHW (m)	Storm surge height (m)	Design level : Approx.HHW +Storm surge height(m)	비 고 <Nesting area>
AREA NO.1-1	1.906	1.69	3.596	NO.2-1
	1.476	1.35	2.826	NO.2-2
	1.137	1.12	2.257	NO.2-3
	1.100	1.020	2.120	NO.2-4
AREA NO.1-2	1.906	1.69	3.596	NO.2-1
	1.476	1.35	2.826	NO.2-2
	1.137	1.12	2.257	NO.2-3
	1.100	1.020	2.120	NO.2-4
AREA NO.1-3	1.137	1.12	2.257	NO.2-3
	1.100	1.020	2.120	NO.2-4

Table 3.12 Deepwater design wave for Busan coast.

심해파랑 지점	Hs(m)	Ts(s)	파 향(dir.)	비고
1919 (N34.86°, E129.38°)	10.2	14.0	SSW	Case 1
	5.2	9.0	SSE	Case 2
	10.0	15.0	S10°W	Case 3
	4.0	7.7	E	Case 4
	4.8	8.5	ENE	Case 5
1819 (N34.77°, E128.80°)	9.3	13.0	SSW	Case 6
	10.1	14.0	S	Case 7
2018 (N35.42°, E129.85°)	6.8	11.0	NNE	Case 8

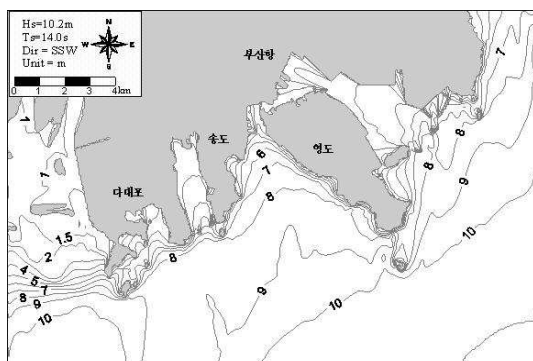


(a) Case 3

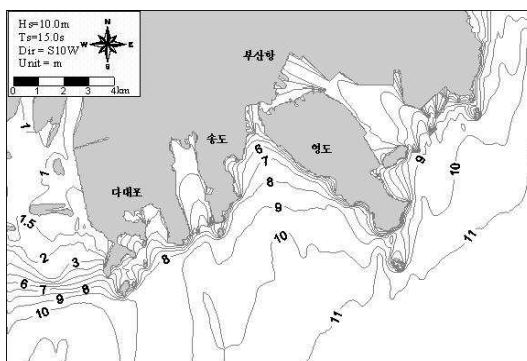


(b) Case 7

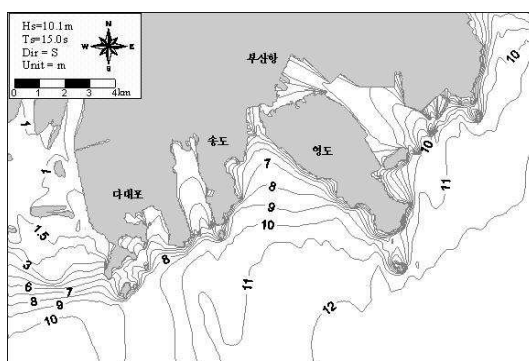
Fig. 3.35 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-1.



(a) Case 1

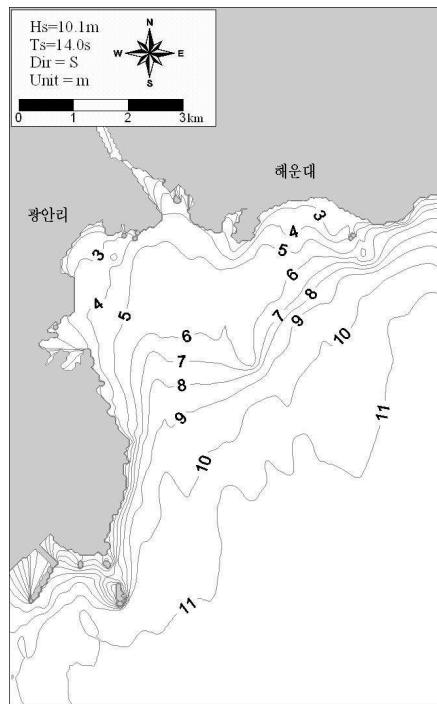


(b) Case 3



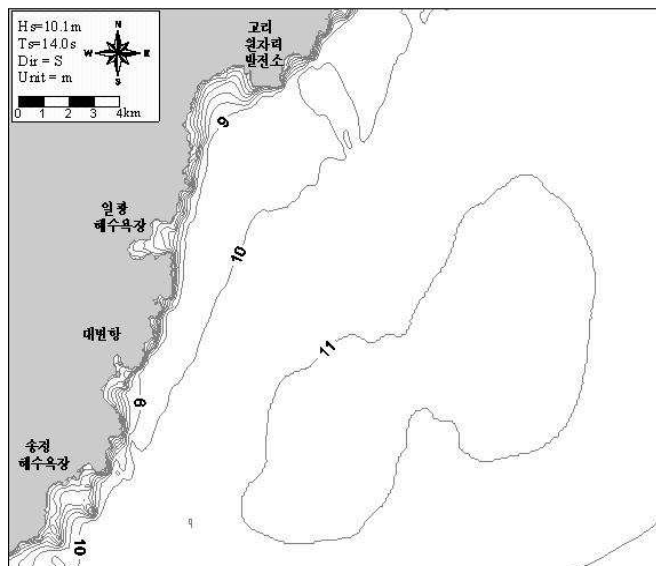
(c) Case 7

Fig. 3.36 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-2.



(a) Case 7

Fig. 3.37 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-3.



(a) Case 7

Fig. 3.38 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-4.

(2) 신심해설계파랑 조건에 의한 천해파랑

계산을 수행하기 위해서 계산영역은 Fig. 3.21을, 격자구성에 대한 제반사항은 Table 3.6을, 수심은 Fig. 3.7을, 바람장은 Fig. 3.17과 Fig. 3.19를 사용하며, 신심해설계파 제원(한국해양연구원, 2005)은 Table 3.7을, 3.1절에서 추산한 폭풍해일고와 조위(해양수산부, 2000)는 Table 3.8에 제시한 제원을 사용한다.

Table 3.7에 주어진 모든 신심해설계파랑의 조건으로 계산을 수행한 일례(각 중역별 최대파고)를 Fig. 3.39~Fig. 3.42에 나타낸다.

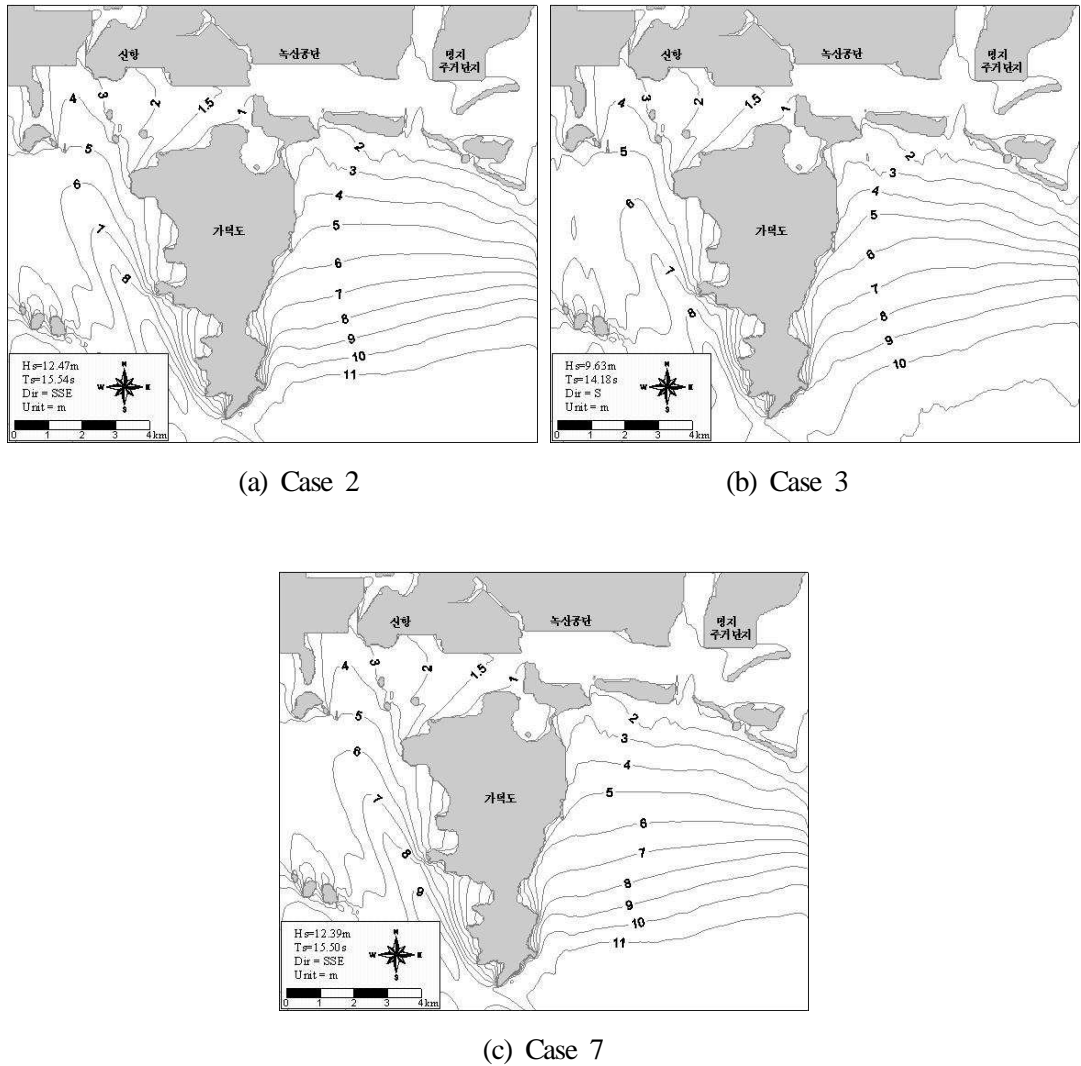
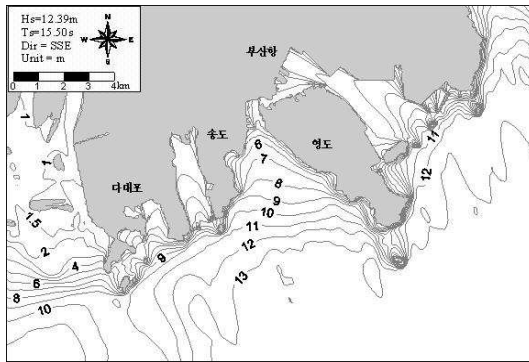
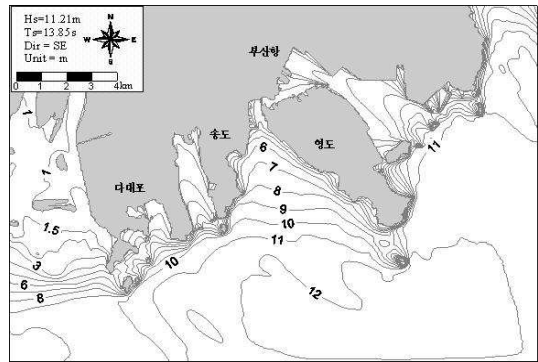


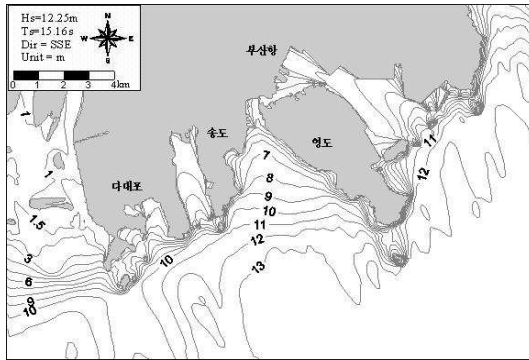
Fig. 3.39 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-1.



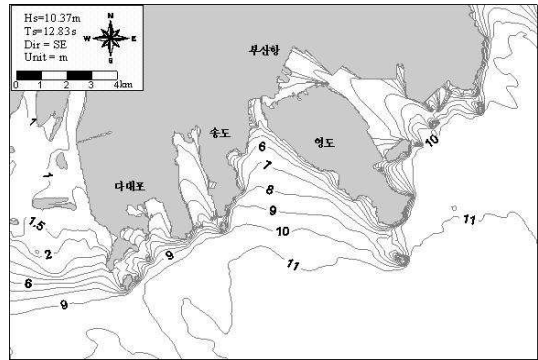
(a) Case 7



(b) Case 11

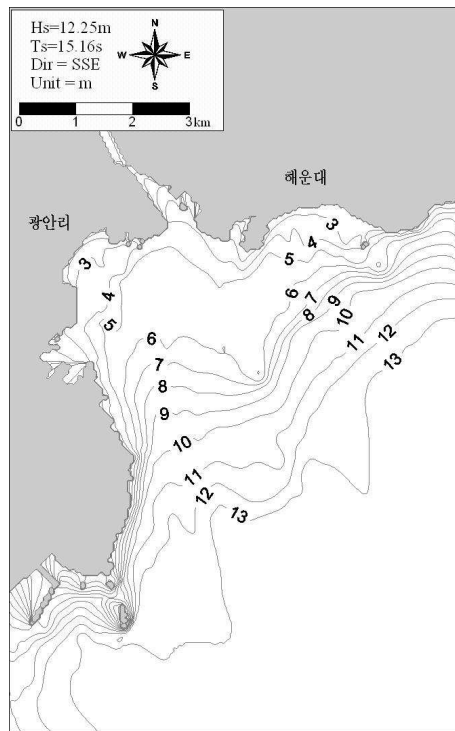


(c) Case 12



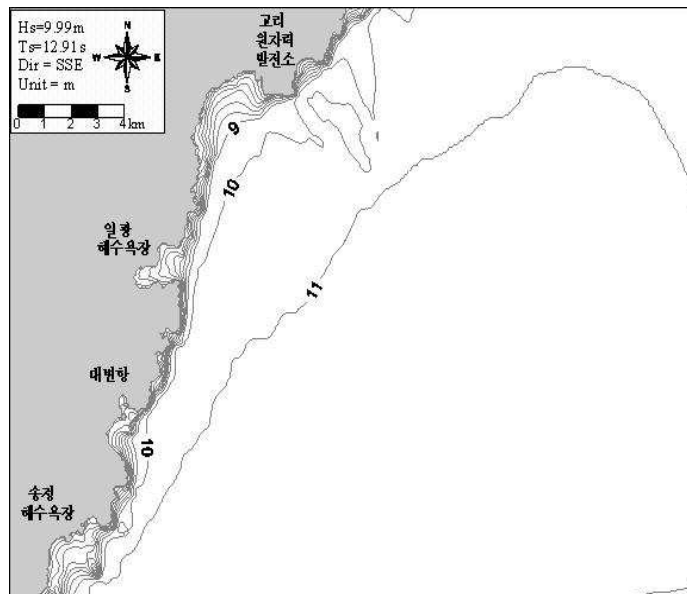
(d) Case 16

Fig. 3.40 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-2.

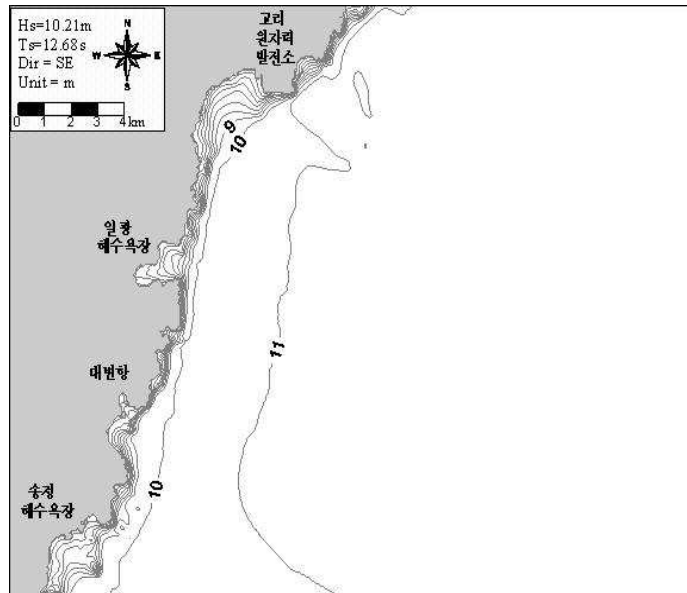


(a) Case 12

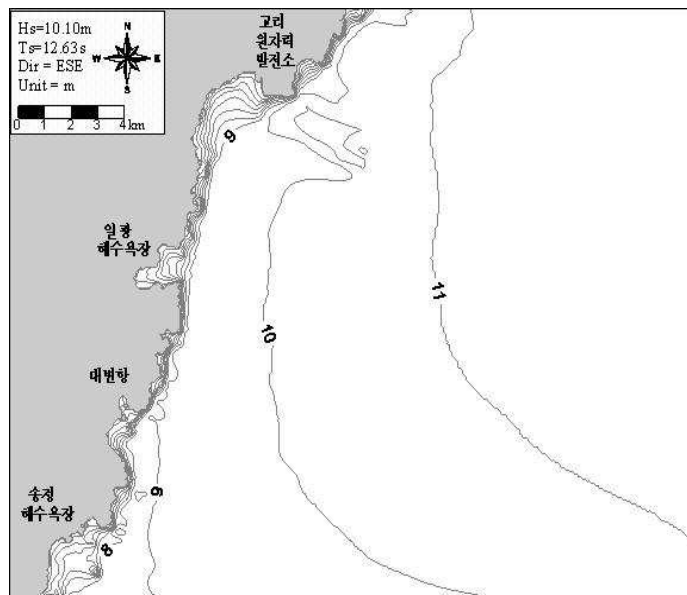
Fig. 3.41 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-3.



(a) Case 17



(b) Case 21



(c) Case 25

Fig. 3.42 Maximum wave height distribution of AREA NO.2-4.

(3) 천해파고 비교

Fig. 3.35~Fig. 3.38의 구심해설계파에 의해 산정된 파고분포도와 Fig. 3.39~Fig. 3.42의 신심해설계파에 의해 산정된 파고분포도를 비교하면, 먼저 Fig. 3.35와 Fig. 3.39에서 신항, 녹산공단, 명지주거단지 등의 천해영역에서 쉽게 파고의 차이를 찾아볼 수 없을 만큼 미약한 차이를 나타내지만, 가덕도의 끝단의 좌·우 주변 영역은 Fig. 3.35에서는 10m 내외의 파고값이 산정되었으나 Fig. 3.39에서는 11m내외의 파고값이 산정됨을 확인할 수 있다. Fig. 3.36과 Fig. 3.40의 다대포에서 영도, 부산항까지의 영역에서도 천해영역에서는 파고분포의 차이를 찾기 힘들지만, 구심해설계파의 파고분포가 외해 12m내외에서 다대포 입구 8m, 송도와 영도 중간해상에서 7~8m, 부산항 입구 조도 및 오륙도 방파제 개구부 해상에서 10m 내외의 분포를 보이는 반면에, 신심해설계파에 의해 산정된 파고분포도에서는 외해 13m내외, 다대포 입구 9m, 송도와 영도 중간해상에서 7~8m, 부산항 입구 조도 및 오륙도 방파제 개구부 해상에서 11m로 1m정도 높은 분포를 나타낼 수 있다. Fig. 3.37과 Fig. 3.41의 광안리, 해운대영역에서는 이전의 영역과 마찬가지로 외해에서는 10~11m와 12~13m로 파고분포가 차이 나지만 광안리 해수욕장 전면이나 해운대 해수욕장 전면에서는 각각 3m로 비슷한 파고분포를 나타낸다. 기장군 일대의 Fig. 3.38과 Fig. 3.42를 보면 남동해상의 파고분포가 10~11m로 거의 비슷하고, 천해로 오면서 급변하는 수심의 영향으로 파고값이 급격히 줄어들어 중역에서는 상세한 파고분포는 알 수 없지만 신심해설계파에 의한 파고분포가 전체적으로 높음을 알 수 있다.

전 연안에 대해서 외해일수록 신심해설계파로 산정한 파고값이 높음을 확인할 수 있었으나, 천해로 가까이 올수록 각 심해설계파 사이의 파고값의 차이가 줄어드는 것은 파랑변형(천수, 굴절, 쇄파)의 영향인 것으로 판단된다.

(4) 수심 20m에 있어서 파고 및 주기산정

일반적으로 수치모형실험 수행 후 수치모형실험에서 고려하지 못한 구조물의 안정성, 월파 및 침수 등의 영향과 수치모형실험의 정확성을 검증하기 위한 자료로써 수리모형실험을 하게 된다. 여기서는 수리모형실험 수행 시 입사제원(유의파고, 유의주기)의 개략적인 값을 제시함으로써 수리모형실험을 용이하게 하고자한다. 그리고, 해안·항만 구조물의 건설 위치가 수심 10m 내외인 것을 감안하여, 본 연구의 대상 해역인 부산광역시 전연안의 수심 20m선에 대한 유의파고와 유의주기를 Fig. 3.44에 나타내었다.

Fig. 3.43에서 숫자는 수심 20m를 따라서 나타내었으며, 이것과 개략적인 지명은 Fig. 3.44의 그림상에서 위치를 표시한다. 다음의 Fig. 3.44에서 가로축은 수심선을 따른 누가 거리이며, 세로축은 각각 유의파고, 유의주기, 파향을 나타내고 있다. 그림을 비교하면 가덕도와 다대포 사이의 해상에서만 두 심해파 사이에 차이가 없으며, 이를 제외한 거의 대부분의 지역에서 유의파고, 유의주기, 파향의 값이 구심해설계파보다 신심해설계파가 높은 수치를 나타낸다. 이는 구심해설계파로 추정된 천해설계파량을 전 연안에 걸쳐서 재추정하여야 파소설계로 인한 피해를 막을 수 있다고 판단된다. 그리고, 그림에서 각각의 제원들의 값이 급변하는 구간이 발생되는데 이는 육지의 영향으로 판단된다.

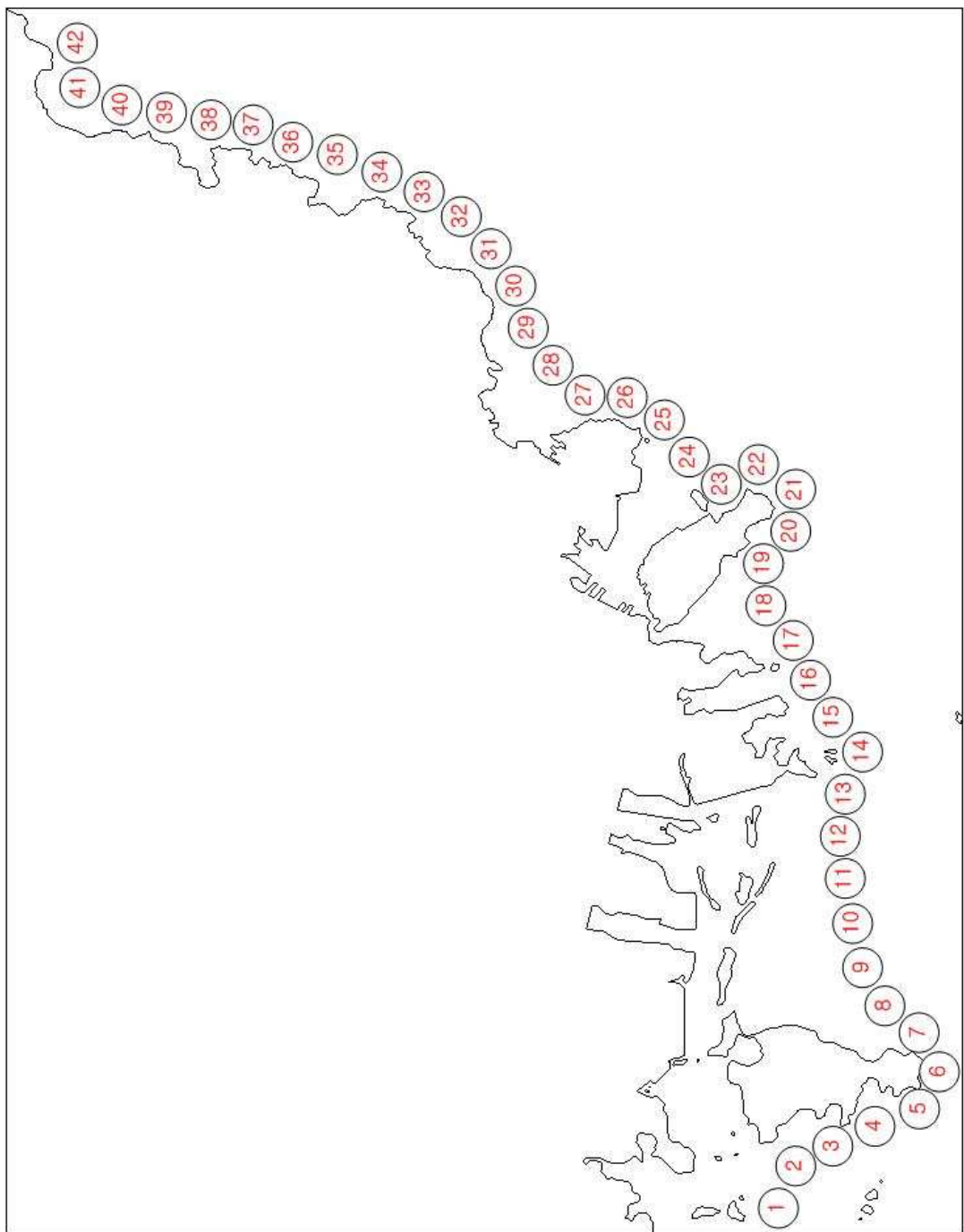
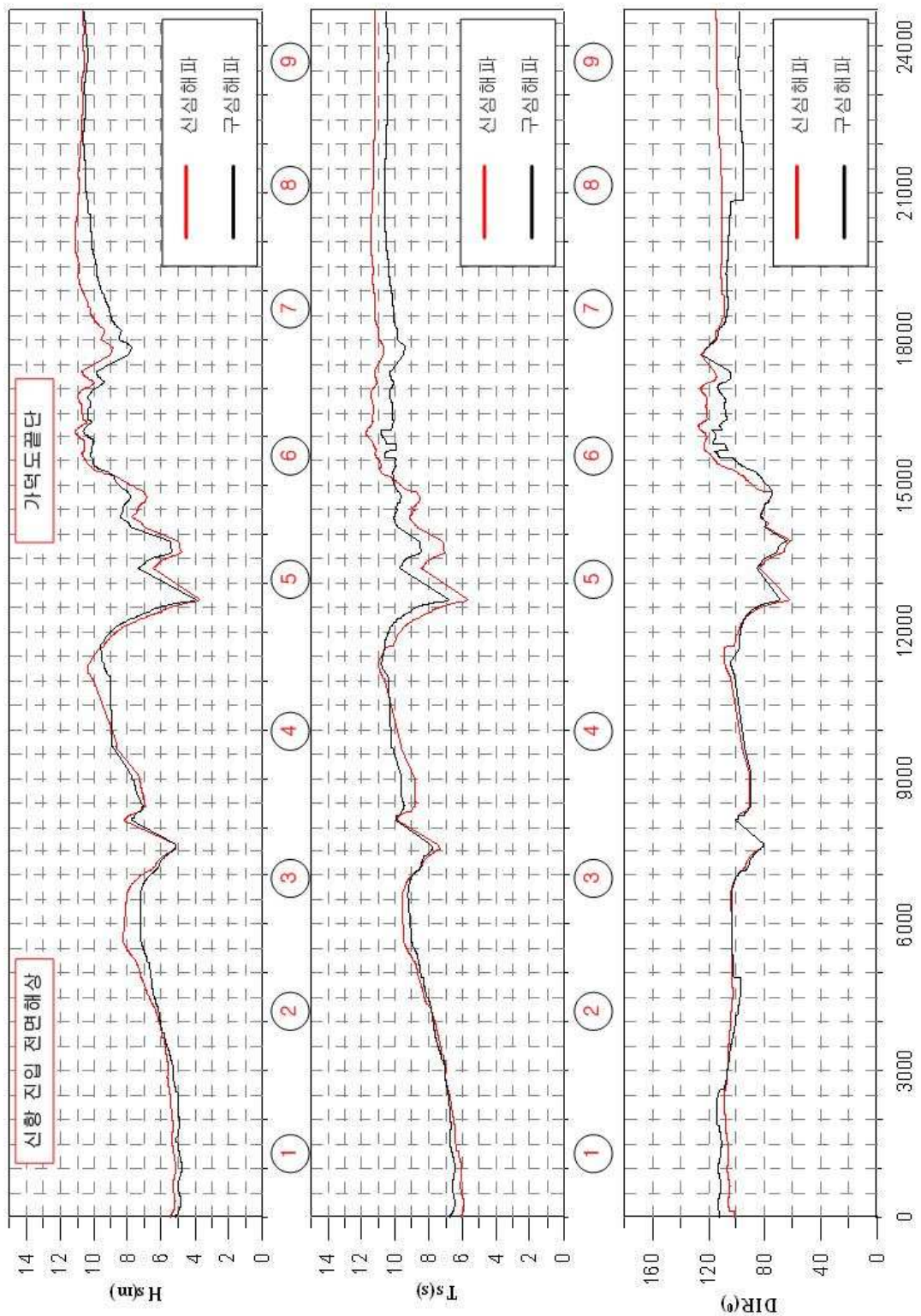
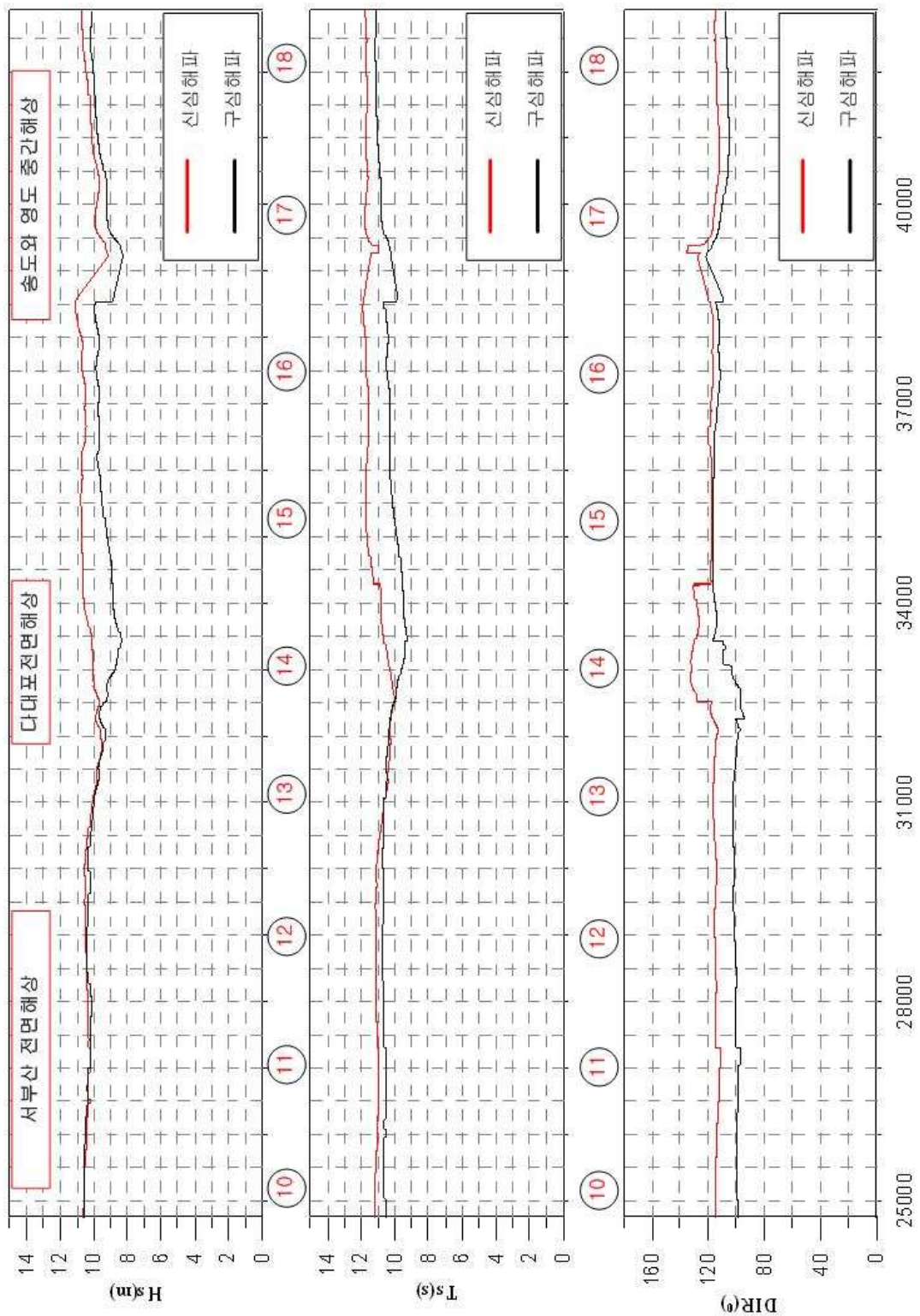
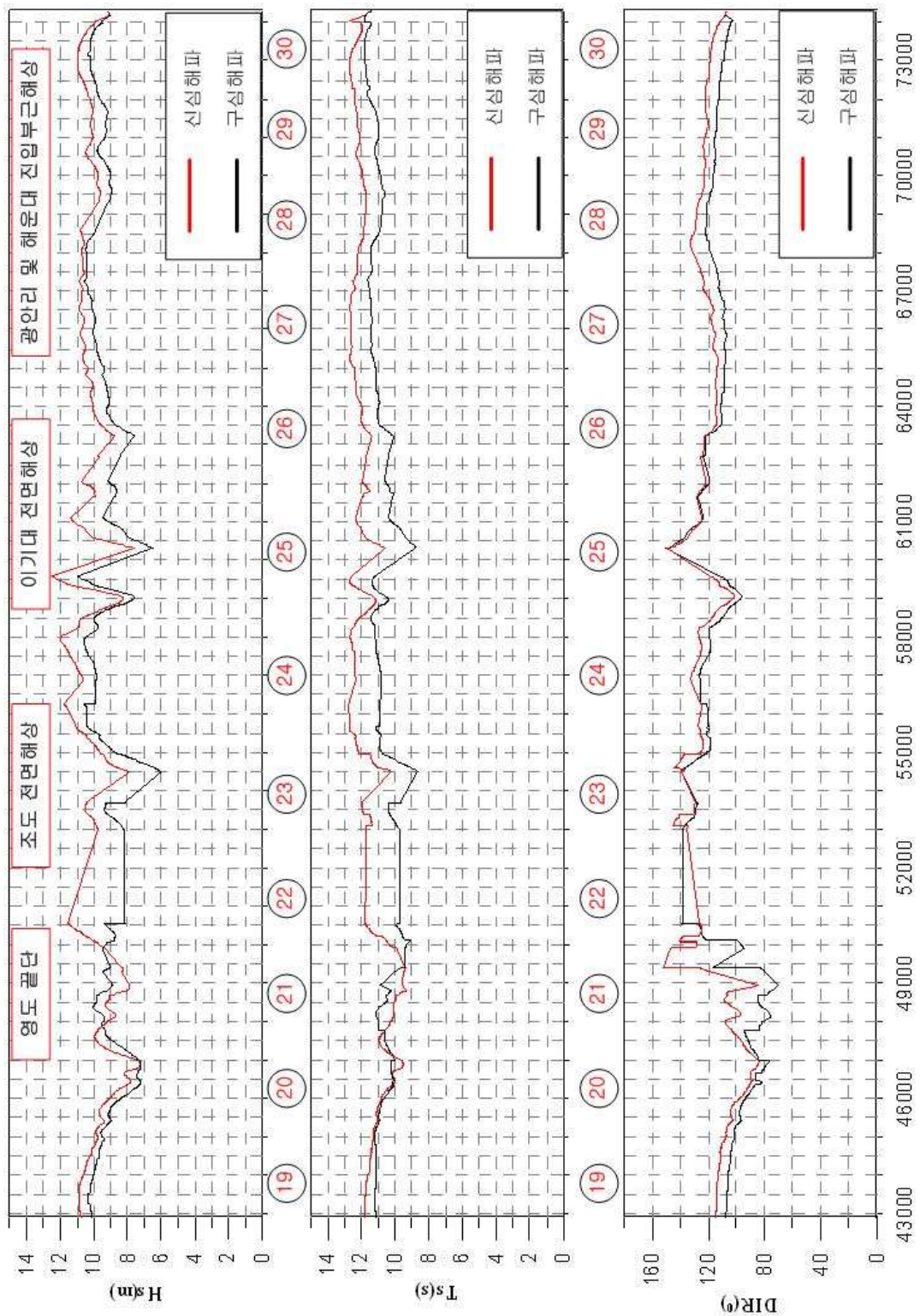


Fig. 3.43 Contour line of water depth 20m around Busan coast.







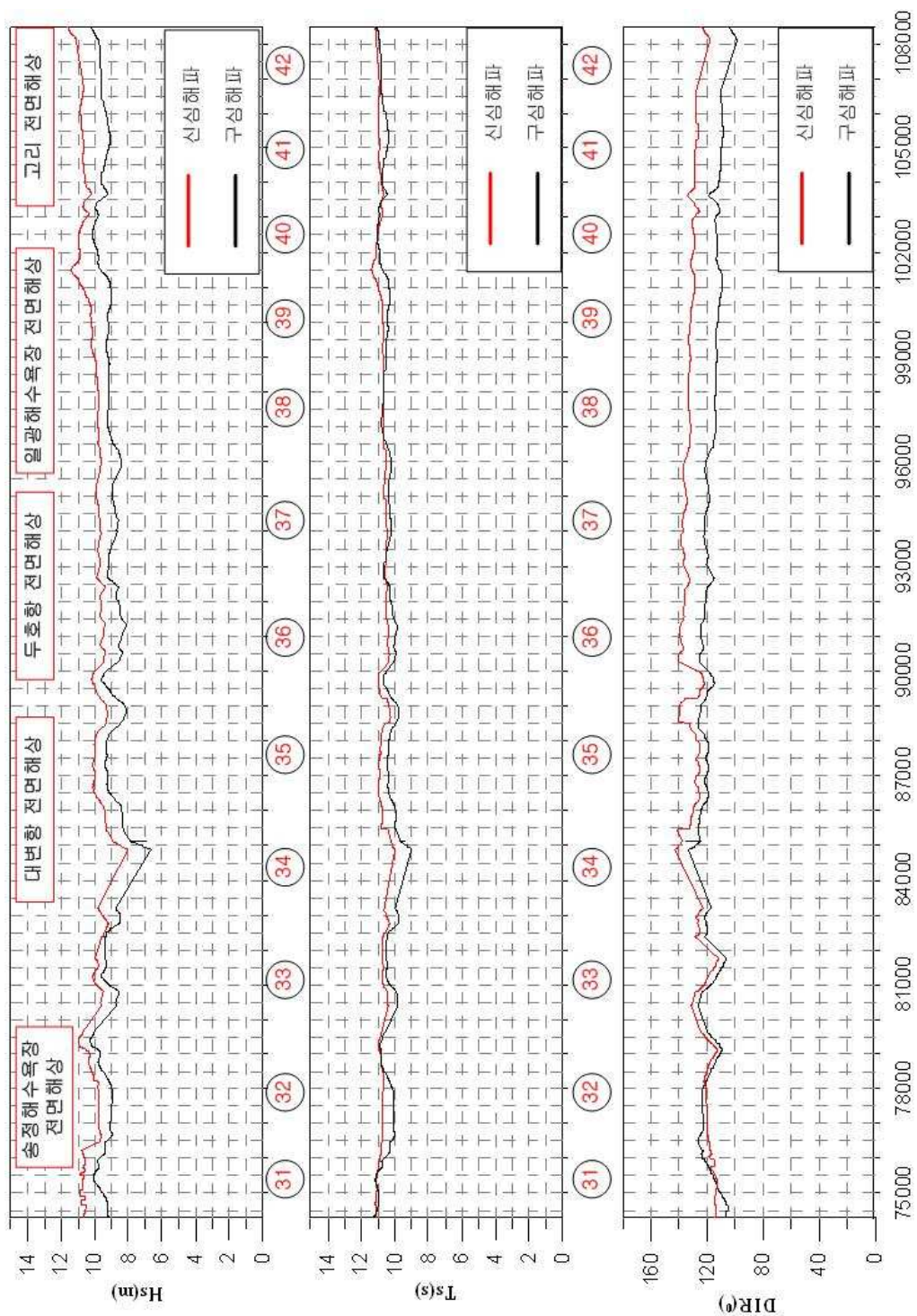


Fig. 3.44 Maximum significant wave height, period and direction on contour line of water depth 20m around Busan coast.

3.4 월파랑산정 및 범람해석

3.4.1 월파랑산정

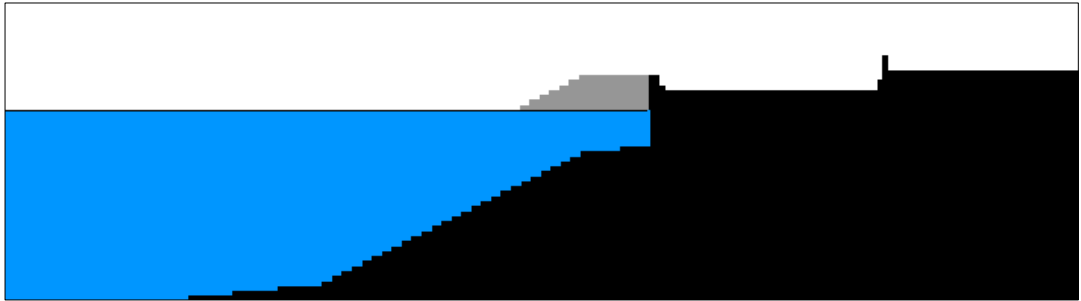
Fig. 3.31과 Fig. 3.32의 결과로부터 삼익아파트 전면해역에서 얻어지는 최대유의파고 및 최대유의주기를 입사파 조건으로 하여 삼익아파트 전면호안에 대한 월파랑을 VOF법 으로부터 산정한다. 전절에서 산정한 파고분포와 주기분포를 아래의 Table 3.13에 간략 히 나타내었다. 여기서, 주기의 분포만을 생각하면 Case 12가 가장 많은 월파랑이 산정 되어야 하지만 긴 주기에 비해 상대적으로 파고가 작기 때문에 적절하지 않고, 파고의 분포만으로 생각하면 Case 19가 가장 많은 월파랑이 산정되어야 하지만 상대적으로 높은 파고에 비해 주기가 짧기 때문에 최대월파랑을 산정하는 경우에는 적절하지 않다. 이중에서 파고분포도 상대적으로 높고 주기분포 또한 높은 Case 16($H_s=10.37m$, $T_s=12.83sec$, Dir=SE)의 값으로 최대 월파랑을 추정하기 위한 제원으로 사용한다. 최대유의파고 및 최대유의주기는 각각 $H_{1/3} = 390cm$, $T_{1/3} = 12.79 sec$ 다.

Table 3.13 Distribution of significant wave height and period around front seawall of Samik APT.

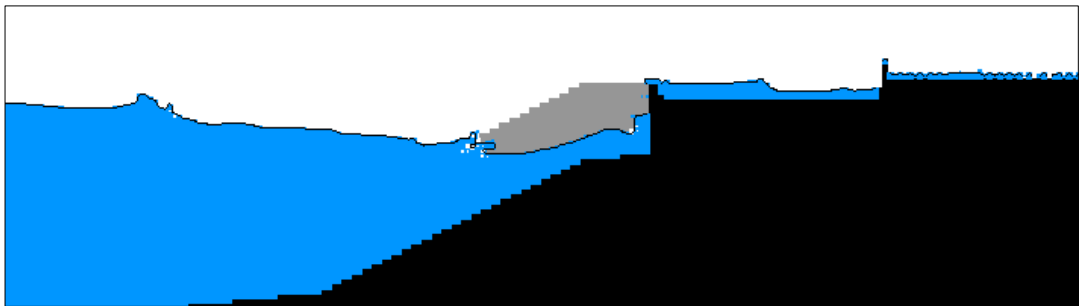
심해파제원	$H_{1/3}(cm)$	$T_{1/3}(s)$
Case 12($H_s=12.25m$, $T_s=15.16sec$, Dir=SSE)	353~357	13.25~13.70
Case 13($H_s=9.91m$, $T_s=14.33sec$, Dir=S)	328~354	11.57~12.09
Case 16($H_s=10.37m$, $T_s=12.83sec$, Dir=SE)	356~390	12.23~12.79
Case 17($H_s=9.99m$, $T_s=12.91sec$, Dir=SSE)	349~372	12.12~12.53
Case 19($H_s=8.04m$, $T_s=11.54sec$, Dir=E)	355~403	11.04~11.63

Fig. 3.45는 VOF법으로 계산하여 얻어진 월파현황의 일례를 나타내며, 파랑산정에 고려하지 않았던 TTP의 반사율은 계산상에서 공극률로 대체하여 사용하였으며, (a)는 계산시작시간에서의 시작상태를 나타내고, (b)는 2~3번의 파가 전면 호안뿐만아니라 해안 도로 배후옹벽까지 월파하고 전면호안에서 파곡이 나타나는 그림이다. 그리고, (c)는 (b)

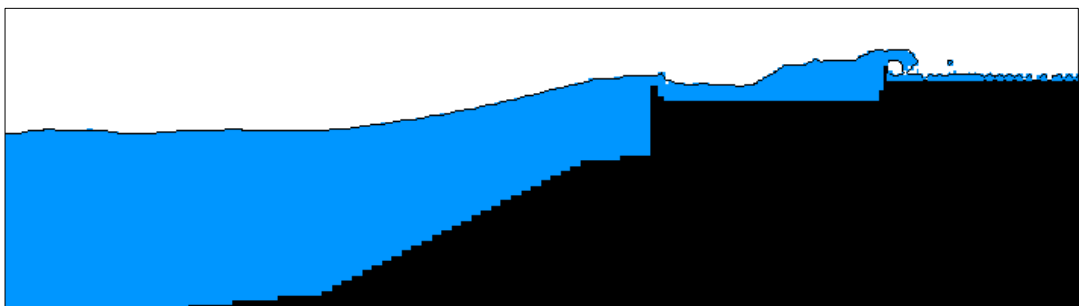
시간 이후에 2~3번의 파가 더 월파가 된 경우에, 전면호안과 해안도로 배후옹벽에서 월파상황을 보여주는 그림이다. 이와같이 산정된 월파량은 전면호안에서 $0.0192m^3/m \cdot s$ 해안도로 배후옹벽에서 $0.0176m^3/m \cdot s$ 이다. 이 값은 호안의 배후지가 주거지역인 경우의 허용월파량 $0.01m^3/m \cdot s$ (해양수산부, 2000)을 초과한다.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 3.45 Snapshot of overtopping.

3.4.2 범람예측

전절에서 얻어진 월파량으로 삼익아파트의 단지내에서 범람을 예측하였다. 이 때 호안 및 옹벽의 선단부에서 월파하는 것으로 하였으며, 삼익아파트내와 주변도로 및 주택 등을 세밀히 고려하기 위하여 격자를 x 축으로 $1m$, y 축으로 $2m$ 로 각각 설정하여 계산하였다. 범람모델의 수행에서 중요한 입력치인 지반고는 Land Desktop3 프로그램으로 대상영역의 호안, 옹벽, 건물 및 도로까지 포함된 각각의 지반고를 입력하였다. 또한, 계산시간은 실제 태풍내습시간에 따른 영향과 경향을 일치시키기 위하여 1시간 30분으로 하였으며, 저면의 조도가 다르고 조도계수에 따라 범람류의 거동에 영향을 미치므로, 조도계수로 도로는 0.04(福岡, 1996), 건물은 밀도비에 따라 0.03~0.8(Miura and Shimizu, 1993)의 범위의 값을 적용하였다.

Fig. 3.46은 본 계산에서 얻어진 범람의 해석결과를 나타낸 것이다. 해석결과에 따르면 삼익아파트 단지내의 대부분이 침수되는 것을 알 수 있고, 해안에서 떨어져 있는 아파트단지내의 도로에서는 $0.1\sim0.5m$ 정도의 침수가, 아파트단지내의 해안도로 배후옹벽에 가까운 도로에서는 $0.6\sim1.0m$ 정도의 침수가, 해안산책로에 대해서는 $1.3m$ 내외의 침수가 발생하였다.

여기서, 해석결과는 3.1절에서 광안리 인근에 대해서 추정된 최대폭풍해일고가 태풍 Maemi보다 태풍 Sarah 내습시 더 크게 나타났기 때문에(Table 3.5) 태풍 Sarah에 의해서 추정된 폭풍해일고와 바람장을 입력조건으로 하여 계산을 수행하였다. 그러나, 1959년에 내습한 태풍 Sarah 내습시의 침수피해 상황은 현재와 지형의 형상도 다르고 침수피해에 대해서 정확히 인지할 수가 없는 관계로, 가장 최근에 내습한 태풍중에 광안리 인근지역에 영향을 많이 미친 태풍 Maemi 내습시의 침수현황도와 비교하고자 한다. 본 결과와 Fig. 3.47의 침수피해 현황도(부산광역시, 2005)를 비교하면 Fig. 3.47에 침수면적만 제시가 되어있고 각각의 영역에 침수고는 제시가 되어 있지 않아 직접적인 비교는 다소 무리가 있지만, 침수면적에서는 본 연구의 해석결과와 전반적으로 잘 일치하는 경향을 확인할 수 있다.

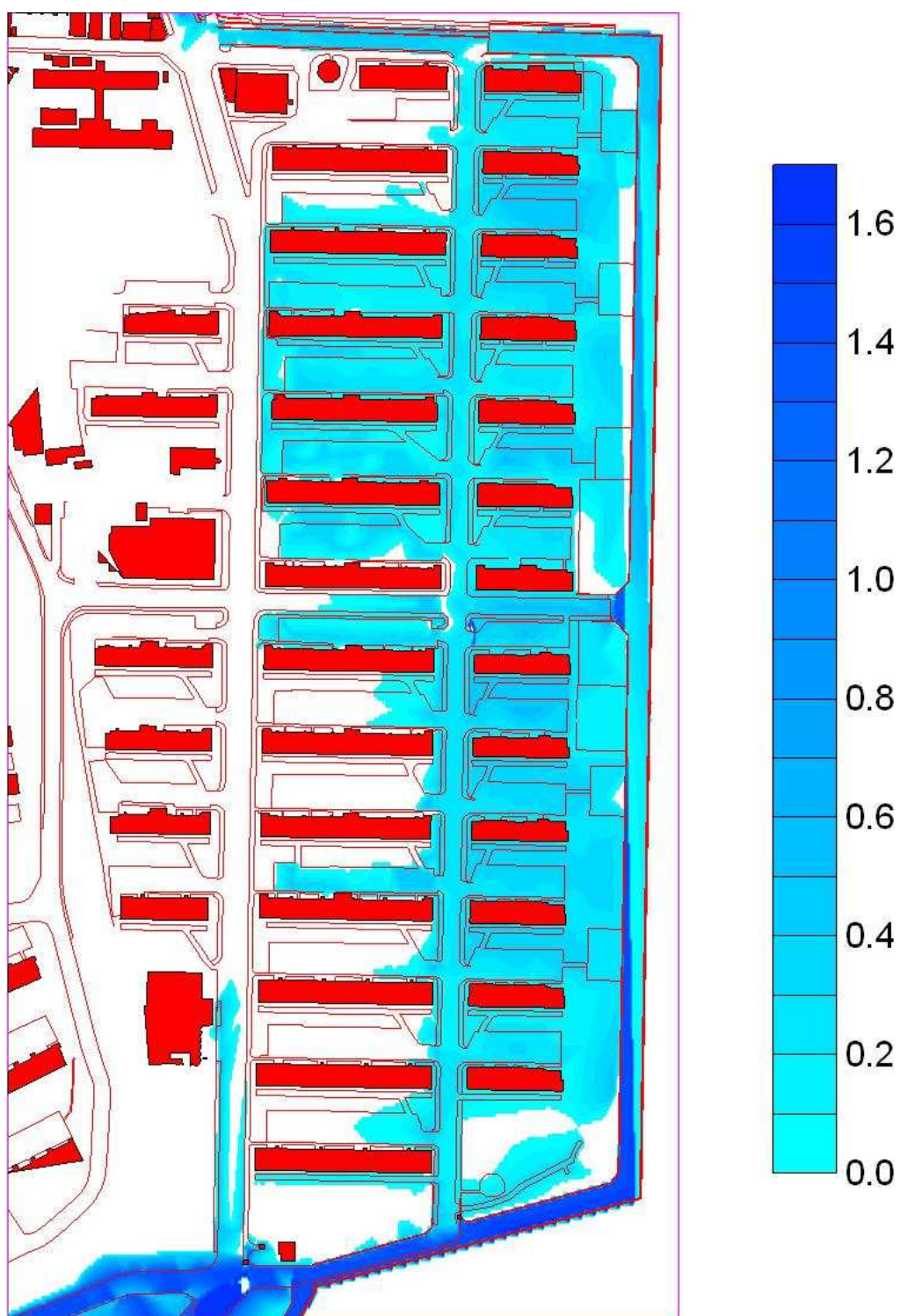


Fig. 3.46 Spatial distribution of inundation height (Unit : m).

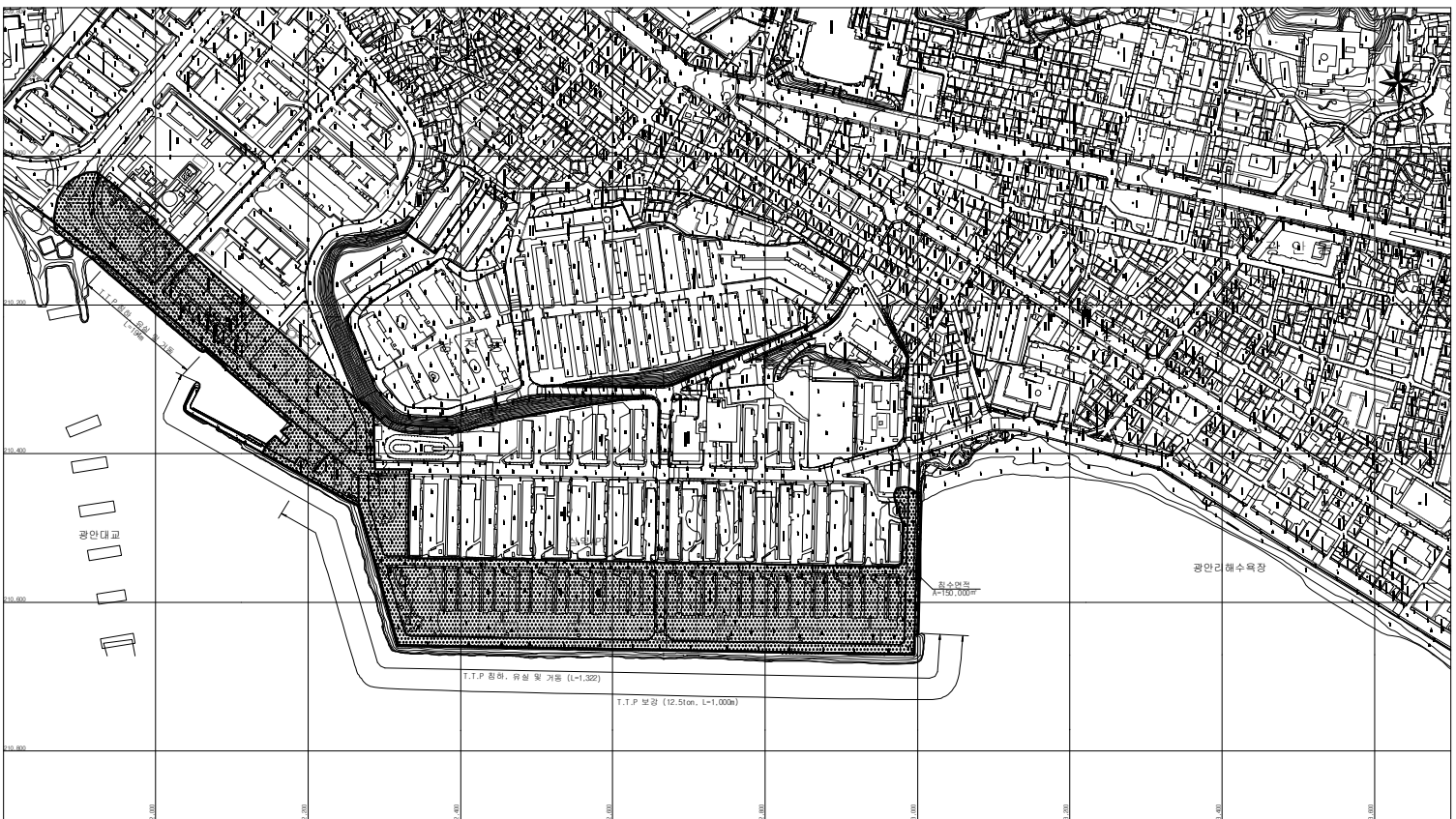


Fig. 3.47 Inundation map around Gwangari for typhoon Maemi.

제4장 결 론

본 연구에서는 최근 부산연안역에 엄청난 피해를 입힌 태풍 Maemi(0314)와 이전에 인적·물적으로 큰 재해를 발생시킨 태풍 Sarah(5914)와 Thelma(8705)를 대상으로 부산연안의 각 지역별로 상세한 폭풍해일고를 추정하였고, 또한 본 해일고의 타당성을 검증하기 위하여 태풍 Maemi 통과시에 부산, 통영, 마산기상대와 검조소에서 관측된 기압 및 폭풍해일고의 시간변화와 본 연구에 의한 수치해석결과치를 각각 비교·분석하였으며, 이로부터 전반적인 좋은 대응성을 확인할 수 있었다.

또한, 정도 높은 천해설계파랑을 추정하고자 수치모델의 하나인 SWAN모델을 이용하여 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지와 광안리 인근을 대상으로 불규칙 파랑에 대해서 지형의 영향을 고려하지 않는 경도풍모델과 지형의 영향이 고려되는 MASCON모델에 의한 바람장을 적용하며 각각의 유의파고를 추산하였다. 그리고, 수심 20m의 위치에 대해 구심해설계파와 신심해설계파에 대해서 각 천해설계파를 추정하여 비교·검토하였다. 산정된 천해파랑을 광안리 인근해역에 적용하여 VOF법으로 월파랑을 산정하였다. 산정된 월파랑으로부터 월류량을 추정하고, 이로부터 제내지의 침수현상을 해석하여 대상지역 배후에 있는 아파트단지내의 범람을 예측하였다. 이와같은 과정에서 얻어진 중요한 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

4.1 폭풍해일

(1) 본 연구에서 제안하는 수치해석기법을 관측치와 비교·검토함으로써 본 연구의 타당성을 검증할 수 있었다.

(2) 과거에 내습한 태풍 Sarah, Thelma, Maemi의 수치시뮬레이션으로부터 부산 서부연안에서는 태풍 Maemi가, 부산 동부연안에서는 태풍 Sarah가 가장 높은 폭풍해일고를 나타내었다.

(3) 부산 서부연안에서는 녹산공단 전면과 가덕도 사이의 협수로로 인하여 수괴의 진행이 차폐되고, 더불어 낙동강하구와 같이 만의 길이가 길고 수심이 얕은 지형적인 특성

으로 조위편차가 크게 나타났다. 반면에, 부산 동부연안은 대체적으로 평활한 해안선으로 이루어져 있기 때문에 지형적인 영향보다는 태풍의 특성(중심기압, 이동속도, 태풍반경)과 이동경로에 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

(4) 보다 정도 높은 폭풍해일을 추산하기 위하여 조석, 밀도성층, 하천수의 유입, wave-setup 등을 고려할 필요가 있고, 이들은 향후 해결되어야 할 과제이다.

4.2 MASCON모델

(1) 지형의 영향이 고려되지 않았을 때의 바람장의 분포는 동심원을 그리며 일정하지만, MASCON모델에 의해 지형의 영향이 고려되면서 지형주위의 풍향이 변하고 풍속이 빨라지는 것으로 MASCON모델의 타당성을 확인할 수 있다.

4.3 SWAN모델

(1) 차폐된 지역일수록 지형을 고려한 바람장을 이용하여 천해파랑을 추산할 필요가 있으며, 지형이 복잡할수록 바람의 영향을 많이 받는다는 기존의 사실을 확인할 수 있었다.

(2) 부산 전연안역의 수심 20m의 위치에 대해서 새롭게 추정된 신심해설계파와 구심해설계파를 이용하여 파랑제원을 산정하였다. 각각의 심해설계파에서 추정된 파랑제원을 비교하면 일부 영역에서 구심해설계파로 추산된 파랑제원이 높게 나타나지만, 전반적으로 신심해설계파로 산정한 파랑제원이 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있으며, 이는 구심해설계파에 의해 추정된 천해설계파랑의 제원을 재검토해야 할 필요성이 있다고 판단된다.

(3) 보다 정도 높은 유의파고의 추산을 위해서 조석 및 조류, 하천유입 등의 고려될 필요가 있으며, 이는 향후 해결되어야 할 과제이다.

4.4 월파량산정 및 범람해석

(1) 연안역의 범람을 예측하기 위하여 폭풍해일-고파랑-월파-범람이라는 체계적인 결합 침수해석 기법을 개발함과 동시에, 부산광역시 수영구 광안리 해역에 최대폭풍해일고를 나타낸 태풍 Sarah 내습시를 대상으로 수행된 범람해석결과는 기존의 침수사례와 비교하여 어느 정도 타당성을 갖는 것으로 판단된다.

(2) 본 연구에서 제시하는 방법을 적용하면 연안역에서 범람을 추정할 수 있고, 이의 결과를 사용하여 연안재해의 예측, 방재계획의 수립, 위험도의 작성 등에 충분히 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 향후 건물 등의 지하로 유입되는 침수량을 고려하여 보다 정도 높은 해석을 수행하고자 한다.

〈 참고문헌 〉

- [1] 김도삼, 이광호, 2002 : 월파를 허용하는 투과성 방파제의 파랑변형에 관한 수치해석, 한국해양공학회지, 16(2), pp.1-5.
- [2] 김도삼, 이광호, 허동수, 김정관, 2001 : VOF법에 기초한 불투과잠제 주변파동장의 해석, 대한토목학회논문집, 21(5-B), pp.551-560.
- [3] 강윤구, 2005 : 태풍 매미 내습시 해일·고파랑에 의한 호안안벽에서의 수위증가 패턴 고찰, 한국해양공학회지, 제19권, 제6호, pp 22-28.
- [4] 강윤구, 富田孝史, 김도삼, 안성모, 2004 : 태풍 매미내습시 남동연안에서의 해일·파랑에 의한 침수재해 특성, 한반도 해역의 고파·폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안·해양공학회, pp 35-43.
- [5] 강용균, 2004 : 태풍 ‘매미’ 통과시의 해일공명, 한반도 해역의 고파·폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안·해양공학회, pp 57-62.
- [6] 김경옥, 山下隆男, 2004 : 해파-해일 복합현상에 의한 해일고 산정, 한반도 해역의 고파·폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안·해양공학회, pp 81-86.
- [7] 부산광역시, 2005 : 해일피해영향분석 및 피해방지계획수립용역 보고서.
- [8] 이종섭, 주귀홍, 장선덕, 1990 : 부산 연안 폭풍해일의 변동양상과 수치예측, 한국해안·해양공학회 논문집, 제2권, 제2호, pp 104-111.
- [9] 최병호, 2004 : 태풍 매미호에 의한 해안 재해, 한반도 해역의 고파·폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안·해양공학회, pp 1-34.

- [10] 최병호, 엄현민, 김현승, 정원무, 심재설, 2004 : Wave-Tide-Surge Coupled Simulation for Typhoon Maemi, 한반도 해역의 고파·폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해양해양공학회, pp 121-144.
- [11] 한국해양연구원, 2005 : 전해역 심해설계과 추정 보고서Ⅱ.
- [12] 해양수산부, 2000 : 항만 및 어항설계기준.
- [13] Atsuyoshi MIURA and Yasuyuki SHIMIZU, 1993 : Flood flow analysis in urban areas, International Conference on Environmentally Sound Water Resources Utilization Bangkok, Thailand.
- [14] Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen, 1978 : Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp.569-587.
- [15] Battjes, J.A. and M.J.F. Stive, 1985 : Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves, J. Geophys. Res., 90, No. C5, 9159-9167
- [16] Eldeberky, Y. and J.A. Battjes, 1995 : Parameterization of triad interactions in wave energy models, Proc. Coastal Dynamics Conf. '95, Gdansk, Poland, pp.140-148.
- [17] Hasselmann, K., 1974 : On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping, Bound.-layer Meteor., 6, 1-2, pp.107-127.
- [18] Hasselmann, K., and T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973 : Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project(JONSWAP), Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8.

- [19] Hirt, C.W., and B.D. Nichols, 1981 : Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys., 39, pp.201-225.
- [20] Kawai, H., Kim, D.S., Kang, Y.K., Tomita, T. and Hiraishi, T., 2005a : Hindcasting of Storm Surge at Southeast Coast by Typhoon Maemi, 한국해양공학회지, 제19권, 제2호, pp 12-18.
- [21] Kawai, H., Kim, D.S., Kang, Y.K., Tomita, T. and Hiraishi, T., 2005b : Hindcasting of Storm Surges in Korea by Typhoon 0314(Maemi)", Proceeding of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, pp 446-453.
- [22] Komen, G.J., S. Hasselmann, and K. Hasselmann, 1984 : On the existence of a fully developed wind-sea spectrum, J. Phys. Oceanogr., 14, pp.1271 -1285.
- [23] McDonald, A. and D. Ledger, 1981 : Flood Area Modeling from an Elementary Data Base, Journal of Hydrology, Vol.53, pp85-94.
- [24] Miles, J.W., 1957 : On the generation of surface waves by shear flows, J. Fluid Mech., 3, pp.185-204.
- [25] Mitsuyasu, H. and Kusaba, T., 1984 : Drag Coefficient over Water Surface under the Action of Strong Wind, Journal of Natural Disaster Science, Vol.6, No.2, pp 43-50.
- [26] Myers, V.A. and Malkin, W., 1961 : Some Properties of Hurricane Wind Fields as Deduced from Trajectories, U.S. Weather Bureau, National Hurricane Research Project, Report 49.
- [27] Petit, H. A. H., Tonjes, P., van Gent, M. R. A., and van den Bosch, P., 1994 : Numerical simulation and validation of plunging breakers using a 2D Navier-Stokes model, Proc. 23rd Int. Conference on Coastal Eng., ASCE, pp. 511-524.

- [28] Phillips, O.M., 1957 : On the generation of waves by turbulent wind, J. Fluid Mech., 2, pp.417-445.
- [29] Makoto Takeda, Pokharel Parameshor and Naoki Matsuo, 2005 : The Study on overlapping between flood and storm surge in river and estuary region, 한국수자원학회 학술대회지, pp.868~867.
- [30] Van Gent, M. R. A., Tonges, H. A. H., and van den Bosch, 1994 : Wave action on and in permeable structure, Proc. 23rd Int. Conference on Coastal Eng., ASCE, pp. 1739-1753.
- [31] Wu, J., 1982 : Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane, J. Geophys. Res., 87, C12, pp.9704-9706.
- [32] Xanthopoulos, Th. and Ch. Koutitas, 1976 : Numerical Simulation of a Two Dimensional Flood Wave Propagation Due to Dam Failure, Jour. Hydraulic Research, Vol.14, No.2, pp.321-330.
- [33] Goda, Y, 1985 : Random Seas and Design of Maritime Structures, University of Tokyo Press
- [34] 紫木秀之, 2004 : 波浪・高潮・津波の数値計算と沿岸防災支援システムへの応用に関する研究, 東京大學博士學位論文.
- [35] 岩田好一朗, 川崎浩司, 金度三, 1994 : 水中構造物による碎波の数値解析, 海岸工學論文集, 42, pp.781-785.
- [36] 許東秀, 2000 : 潛堤による多方向不規則波の碎波特性と潛堤上の構造物に作用する波力特性に関する基礎的研究, 名古屋大學學位論文, 177p

- [37] 沿岸開発技術研究センタ, 2001 : CADMAS-SURF 数値波動修路の開発・研究, pp.10-29.
- [38] 武田 誠, 1996 : 高潮の氾濫解析法とその都市域への応用に関する研究, 京都大學博士學位論文.
- [39] 福岡捷二, 川島幹雄, 松氷宣夫, 前内氷敏, 1994 : 密集市街地の氾濫流に関する研究, 土木學會論文集, No.491/II-27, pp.51-60.